

تحلیل قابلیت اعتماد طراحی ضخامت روکش بر اساس آیین نامه روسازی ایران

مهدی قدرت‌آبادی^۱، محمد یکرنگ‌نیا^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

yekrangnia@sru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

چکیده

در این تحقیق، کفایت روش مورد توصیه آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) به منظور طراحی روسازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه روشی بر مبنای قابلیت اعتماد برای بهبود طراحی بر اساس این آیین‌نامه پیشنهاد شد. برای مقایسه دو روش، داده‌های ترافیک عبوری و وضعیت روسازی محور قم-سلفچگان جمع‌آوری شد. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در طراحی مناسب‌ترین توزیع احتمال هر متغیر به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ تعیین شد. مطابق نتایج به دست آمده، نشریه ۲۳۴ سطح اطمینان روسازی را حدود ۲۰ درصد بیشتر از روش پیشنهادی محاسبه می‌کند. همچنین در سطح اطمینان برابر نیز این آیین‌نامه ضخامت روکش مورد نیاز را نیمی از مقدار محاسبه شده در روش پیشنهادی به دست می‌آورد در نتیجه منجر به طراحی غیر محافظه‌کارانه شده و روسازی در طول عمر و ترافیک کمتری از مقدار طراحی تخریب شده و نیاز مجدد به عملیات تعمیر و نگهداری دارد. در ادامه روش‌های مختلف قابلیت اعتماد با یکدیگر مقایسه شد روش Sampling با احتمال شکست بیشتری نسبت به روش FORM ضخامت روکش مورد نیاز را به دست آورده در نتیجه به صورت محافظه‌کارانه‌تری ضخامت روکش را طراحی می‌کند. برای بررسی دقت نرم‌افزار Rtx، شبیه‌سازی مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R انجام شد با مقایسه این دو حالت مشاهده شد که نرم‌افزار Rtx در سطح اطمینان کمتری نسبت زبان برنامه‌نویسی R طراحی روکش را انجام می‌دهد.

واژگان کلیدی: روسازی انعطاف‌پذیر، تعمیر و نگهداری روسازی، قابلیت اعتماد، عدم قطعیت، توزیع احتمال

۱- مقدمه

الاستیسیته و ضخامت هر لایه با وجود قطعه‌بندی تغییرات زیادی در طول یک مسیر دارند. عدم در نظرگیری این موضوع بر عملیات تعمیر و نگهداری روسازی تأثیرگذار بوده و ممکن است روسازی در عمر یا ترافیک کمتری از طراحی اولیه تخریب شود. در نتیجه احتمال دارد روسازی طراحی شده بر این مبنای دارای عمر مفید کمتری از حد انتظار بوده و به دنبال آن برنامه‌ریزی

طراحی روسازی در آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) مطابق با روش آشتو [1] است. متغیرهای طراحی در این آیین‌نامه به صورت ثابت و بدون توزیع احتمال در نظر گرفته شده‌اند؛ در صورتی که تعداد وسایل نقلیه عبوری، رشد ترافیک سالیانه و متغیرهای مربوط به مقاومت مانند مدول

بلند مدت برای مدیریت راه‌ها را دچار مشکل کند.

آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران برای در نظر گرفتن قابلیت اعتماد در طراحی روسازی از روشی شبیه $FOSM^1$ استفاده می‌کند. $FOSM$ روشی قدیمی، ساده و از نظر محاسباتی کم‌هزینه است. این روش دقت کمی در محاسبه سطح اطمینان به‌خصوص برای توابع غیرخطی دارد. روش‌های دقیق‌تری مانند $FORM^2$ و $Sampling$ برای تحلیل قابلیت اعتماد وجود داشته که معایب روش قبل را برطرف کرده و تحلیل قابلیت اعتماد را با دقت بیشتری برای توابع غیرخطی انجام می‌دهند. پس بهتر است عدم قطعیت متغیرها در نظر گرفته شده و از روش‌های دقیق قابلیت اعتماد برای محاسبه سطح اطمینان روسازی استفاده شود. در این تحقیق سعی شده از روش‌های $FORM$ و $Sampling$ برای تحلیل قابلیت اعتماد استفاده و عدم قطعیت در متغیرها نیز از طریق جمع‌آوری داده‌ها برای محور قم-سلفچگان در نظر گرفته شود.

در این مقاله در ابتدا مروری بر مطالعات پیشین مرتبط با موضوع تحقیق انجام گرفته است. در ادامه خلاصه‌ای از اهداف و چشم‌انداز پژوهش بیان شده و در بخش بعدی به تشریح روش تحقیق پرداخته شد. داده‌های مورد استفاده و تحلیل‌ها در بخش بعدی و نتایج تحقیق در بخش آخر ذکر شده است.

۲- مطالعات پیشین

در مطالعه که توسط ماجی و داس [2] انجام گرفت، روش‌های قابلیت اعتماد در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر بر اساس روش مکانیکی-تجربی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برای مقادیر میانگین، انحراف معیار و توزیع احتمال متغیرهای طراحی داده‌ای جمع‌آوری نشده است. به کمک روش‌های $FOSM$ و شبیه‌سازی احتمال سالم ماندن هر قطعه محاسبه شده است. در ادامه روی پارامترهای مختلف طراحی، آنالیز حساسیت صورت گرفته و مشاهده شد که ضخامت لایه رویه بیشترین تأثیر بر طراحی به روش قابلیت اعتماد دارد.

رترفورد و مکدونالد [3] به مقایسه روش‌های مختلف قابلیت اعتماد در طراحی روسازی بر اساس روش مکانیکی-تجربی پرداخته‌اند. در این تحقیق از روش‌های قابلیت اعتماد $FOSM$ ، $FORM$ ، $Rosenblueth$ ، AMV^3 و شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به عنوان مبنا قرار گرفته و روش‌های دیگر قابلیت اعتماد با آن مقایسه شدند. در این پژوهش برای مقادیر میانگین، انحراف معیار و توزیع احتمال متغیرهای طراحی داده‌ای جمع‌آوری نشده است. در محاسبه بیشترین کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی و بیشترین کرنش فشاری در بالای لایه خاک بستر دو رابطه در این تحقیق پیشنهاد شده که بر اساس محاسبات ۱۶۸ قطعه راه در نرم‌افزار $ILLI-PAVE$ بوده است. سپس مقدار عمر باقی‌مانده بر اساس خرابی خستگی و شیارشدگی محاسبه شد. مقدار بار وارد شده بر روسازی به صورت ثابت و بدون توزیع احتمال فرض شد و با عمر باقی روسازی مقایسه شده تا احتمال شکست روسازی محاسبه شود. بر اساس نتایج این تحقیق احتمال شکست روسازی در روش $FORM$ کمترین تفاوت و روش $FOSM$ بیشترین تفاوت را با نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو داشته است. روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو و $FORM$ بیشترین هزینه محاسباتی و در مقابل روش‌های $FOSM$ و $Rosenblueth$ کمترین هزینه محاسباتی را دارند.

دشپانده و همکاران [4] به طراحی روکش روسازی انعطاف‌پذیر بر اساس روش قابلیت اعتماد تحت خرابی‌های خستگی و شیارشدگی پرداختند. در این تحقیق سیستم طراحی روسازی به صورت سری در نظر گرفته شده و فرض شده اگر یکی از خرابی‌های خستگی یا شیارشدگی رخ دهد کل سیستم خراب می‌شود. برای مقادیر میانگین، انحراف معیار و توزیع احتمال داده‌ای جمع‌آوری نشده است. نتایج آنالیز حساسیت در این تحقیق نشان می‌دهد که ضخامت لایه رویه و سختی لایه خاک بستر بیشترین تأثیر بر مقدار روکش موردنیاز دارند.

1. First Order Second Moment
2. First Order Reliability Method
3. advanced mean value

دیلیپ و همکاران [5] روش‌های انعطاف‌پذیر را بر اساس روش‌های قابلیت اعتماد FORM, SORM¹ و شبیه‌سازی مونت‌کارلو² بر اساس دو حالت خرابی سری و موازی طراحی کرده‌اند. در حالت سری اگر یکی از خرابی‌های خستگی یا شیارشدگی رخ داده کل روسازی خراب می‌شود در حالی که در حالت موازی باید هر دو خرابی خستگی و شیارشدگی رخ داده تا سیستم خراب شود. برای میانگین، ضریب تغییرات و توزیع احتمال متغیرهای ضخامت و مدول الاستیسیته هر لایه از مطالعات گذشته استفاده شد. در این تحقیق مشاهده شد که نتایج طراحی قابلیت اعتماد در روش‌های FORM, SORM و شبیه‌سازی مونت‌کارلو به هم نزدیک بوده و اختلاف کمی با یکدیگر دارند. طبق آنالیز حساسیت انجام‌گرفته در این پژوهش، ضخامت لایه رویه بیشترین تأثیر را بر خرابی‌های خستگی و شیارشدگی دارد.

در تحقیق کالیتا و رجبونگشی [6] به بررسی توزیع احتمال متغیرهای بار وارد شده بر روسازی و مقدار عمر باقی‌مانده بر اساس خرابی خستگی و شیارشدگی پرداخته شده است. حالات مختلفی برای ضریب تغییرات و توزیع احتمال متغیرهای طراحی بر اساس مطالعات گذشته در نظر گرفته شده و در هر کدام از حالات توزیع احتمال بار وارد بر روسازی و مقدار عمر باقی‌مانده بر اساس خرابی خستگی و شیارشدگی به کمک آزمون کای-اسکوئر³ سنجیده شد. برای محاسبه مقدار عمر باقی‌مانده بر اساس خرابی خستگی و شیارشدگی ابتدا حداکثر کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری در بالای لایه خاک بستر به کمک روابطی که در مطالعات گذشته پیشنهاد شده تعیین شد. سپس به کمک شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نرم‌افزار متلب ۱۰۰۰ داده بر اساس توزیع احتمال متغیرهای طراحی تولید شده و مقدار عمر باقی‌مانده بر اساس خرابی خستگی و شیارشدگی محاسبه شد برای محاسبه بار وارد شده بر روسازی نیز همین روند انجام شد. مطابق نتایج پژوهش متغیرهای بار وارد شده بر روسازی و مقدار عمر باقی‌مانده بر

اساس خرابی خستگی و شیارشدگی دارای توزیع احتمال لاگ-نرمال است.

ماچی و همکاران [7] به طراحی ضخامت روکش بر اساس روش قابلیت اعتماد FOSM پرداختند. در این تحقیق برای پارامترهای مختلف طراحی ضریب تغییرات و توزیع احتمال فرضی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه بیشترین کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی و بیشترین کرنش فشاری در بالای لایه خاک بستر از نرم‌افزار IITPave استفاده شده است. مقدار میانگین متغیرها برای محاسبه میانگین حداکثر کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری در بالای لایه خاک بستر مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقدار عمر باقی‌مانده بر اساس خرابی خستگی و شیارشدگی محاسبه شد و با مقدار بار وارد شده در سال طراحی مقایسه و با سعی و خطا مقدار ضخامت روکش تعیین شد. بر اساس آنالیز حساسیت انجام‌گرفته در این تحقیق، مدول الاستیسیته لایه اساس و خاک بستر بیشترین تأثیر بر مقدار روکش موردنیاز دارند.

در پژوهش پدیتی و همکاران [8] به طراحی روسازی انعطاف‌پذیر چند لایه بر اساس روش قابلیت اعتماد سیستم با در نظر گرفتن خرابی‌های خستگی و شیارشدگی پرداخته شده است. برای میانگین، ضریب تغییرات و توزیع احتمال متغیرهای ضخامت و مدول الاستیسیته هر لایه از مطالعات گذشته استفاده شده و بر اساس روش FORM به تحلیل قابلیت اعتماد پرداخته شد. سپس به مقایسه روش ارائه‌شده در این پژوهش که بر اساس روش مکانیکی-تجربی بوده و روش آشتو پرداخته و مشاهده شد که روش آشتو اختلاف ۱۰ درصدی نسبت به روش این تحقیق دارد. مطابق آنالیز حساسیت تغییرات پارامترهای ضخامت لایه رویه و مدول الاستیسیته لایه زیراساس بیشترین تأثیر را بر طراحی روسازی دارند.

در مطالعات بررسی شده مشاهده شد که پژوهشی در خصوص بررسی ضعف‌های روش مورد توصیه آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران در زمینه قابلیت اعتماد انجام نگرفته است. در بخش ۴-۲ به بررسی این ضعف‌ها پرداخته شد

۴- ابزار و روش

در این پژوهش ابتدا متغیرها ثابت و بدون توزیع احتمال در نظر گرفته شده و ضخامت روکش در سطح اطمینان ۸۰ درصد بر مبنای آیین‌نامه ایران محاسبه شد. سپس توزیع احتمال مناسب برای هر متغیر تعیین شد و با توجه به ضخامت روکش به دست آمده از روش قبل، احتمال سالم ماندن هر قطعه توسط روش‌های قابلیت اعتماد FORM و Sampling در نرم‌افزار Rtx [9]- [11] و شبیه‌سازی مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R تعیین شده در ادامه نتایج به دست آمده با آیین‌نامه ایران مقایسه شد. در ادامه به شرح مراحل این تحقیق پرداخته می‌شود.

۴-۱- تحلیل قابلیت اعتماد

برای در نظر گرفتن قابلیت اعتماد در طراحی بر اساس آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران از ضرب دو متغیر Z_R (انحراف معیار نرمال) و S_0 (انحراف معیار کلی پیش‌بینی ترافیک و عملکرد روسازی) استفاده شده است. برای محاسبه سطح قابلیت اطمینان در این آیین‌نامه از روش FOSM استفاده شده و تابع حالت حدی g به صورت رابطه (۱) تشکیل شده است.

$$g = \log(w_{t18}) - \log(w_{18}) \quad (1)$$

که در آن w_{t18} تعداد مجاز کل بارهای محوری ساده ۱۸-kip (۸/۲ تنی) هم‌ارز در طول عمر روسازی و w_{18} تعداد کل بارهای محوری ساده ۱۸-kip (۸/۲ تنی) هم‌ارز وارد شده بر روسازی در طول عمر آن است. در واقع w_{t18} و w_{18} به ترتیب معادل مقاومت (تعداد مجاز بار وارده) و بار وارد شده بر روسازی در اثر ترافیک است. روش آشتو [1] توزیع احتمال w_{t18} و w_{18} را لاگ‌نرمال پیشنهاد کرده است. اگر از این دو متغیر لگاریتم گرفته شود، توزیع آن تبدیل به نرمال خواهد شد. در نتیجه طبق رابطه (۱) تابع حالت حدی g نیز توزیع نرمال خواهد داشت. اگر فرض کرده که رابطه (۱) به صورت خطی بوده می‌توان مقدار میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی g را از طریق روابط (۲) و (۳) محاسبه کرد.

$$\mu_g = \mu_{\log(w_{t18})} - \mu_{\log(w_{18})} \quad (2)$$

در ادامه روش جدیدی برای اصلاح موارد ارائه گردیده است. همچنین در تحقیقات پیشین طراحی روی قطعه راه در واقعیت صورت نگرفته، داده‌ای جمع‌آوری نشده و توزیع احتمال، میانگین و ضریب تغییرات متغیرها به صورت فرضی در نظر گرفته شده است. در صورتی که متغیرهای طراحی می‌تواند هرگونه توزیع احتمال و ضریب تغییراتی داشته باشد در نتیجه نتایج متفاوتی از این تحلیل‌ها گرفته شود. در این تحقیق داده‌های واقعی از راه‌های ایران جمع‌آوری شده سپس مشخصات و توزیع احتمال آن به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ به دست آمد. با توجه به مرور مطالعات پیشین می‌توان گفت که تحقیقات کمی در زمینه تعمیر و نگهداری روسازی بر اساس روش قابلیت اعتماد صورت گرفته است. معمولاً در این تحقیقات نیز از روش FOSM استفاده شده که اولین و ساده‌ترین روش قابلیت اعتماد است این روش برای تحلیل تابع حالت حدی خطی مناسب بوده و هرچه تابع حالت حدی غیرخطی‌تر باشد دقت محاسبات کاهش می‌یابد همان‌طور که در ادامه و در بخش ۴-۲ توضیح داده می‌شود تابع حالت حدی به صورت غیرخطی است. در این تحقیق از روش‌های قابلیت اعتماد FORM و Sampling در طراحی روکش استفاده شده تا مشکلات روش FOSM برطرف شود.

۳- اهداف

هدف این تحقیق بررسی کفایت آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران برای طراحی ضخامت روکش است. آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران بر اساس روش آشتو [1] بوده که ابتدا نواقص آن مورد بررسی قرار گرفت، سپس روش جدیدی بر مبنای قابلیت اعتماد پیشنهاد شد تا نواقص موجود را برطرف کند. نتایج به دست آمده از این دو روش نیز با یکدیگر مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه ضخامت موردنیاز روکش و سطح اطمینان روسازی بر اساس روش‌های مختلف قابلیت اعتماد به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شدند. برای بررسی دقت نرم‌افزار Rtx شبیه‌سازی مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R انجام و نتایج دو حالت نیز با یکدیگر مقایسه شدند.

$$P_f = \Phi\left(\frac{g - \mu_g}{\sigma_g}\right) = \Phi\left(\frac{-\mu_g}{\sigma_g}\right) \quad (5)$$

اگر متغیر Z_R را مطابق رابطه (۶) تعریف کرده و مقدار تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال g را در $-Z_R$ محاسبه کنیم با توجه به اینکه توزیع استاندارد نرمال به صورت متقارن بوده مقدار سطح اطمینان روسازی (R) مطابق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$Z_R = \frac{-\mu_g}{\sigma_g} \quad (6)$$

$$R = 1 - P_f = \Phi(-Z_R) \quad (7)$$

Z_R معادل متغیر β در تحلیل FOSM بوده و مفهوم آن این است که مقدار μ_g به اندازه چند انحراف معیار از تابع حالت حدی g در نقطه صفر فاصله دارد. در شکل ۱ این مفهوم نشان داده شده است. هر چه مقدار Z_R بیشتر شود فاصله μ_g از تابع حالت حدی g در نقطه صفر بیشتر شده و احتمال شکست کاهش می‌یابد.

متغیر Z_R همان انحراف استاندارد نرمال در روابط آشتو بوده که از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. اگر رابطه (۶) را تغییر داده به رابطه (۸) رسیده که همان ضرب Z_R در σ_g روابط آشتو [1] و آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران است.

$$Z_R \times \sigma_g = -\mu_g \Rightarrow Z_R \times \sigma_g + \mu_{w_{18}} = \mu_{w_{18}} \quad (8)$$

مقدار Z_R منفی بوده در نتیجه مطابق رابطه (۸) باعث کاهش $\mu_{w_{18}}$ (مقاومت روسازی) نسبت به μ_{18} (بار وارد شده بر روسازی) و افزایش قابلیت اطمینان در طراحی می‌شود. برای مطالعات بیشتر در این زمینه خوانندگان می‌توانند به مطالعات هوانگ [12] مراجعه کنند.

۴-۲- بررسی ایرادات موجود در روش‌های طراحی

مطابق مطالب بیان شده استفاده از این روش برای در نظر گرفتن قابلیت اعتماد در آیین‌نامه ایران دارای مشکلاتی به شرح زیر است:

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_{\log(w_{18})} - \sigma_{\log(w_{18})}} \quad (3)$$

در شکل (۱) نمودار توزیع احتمال تابع حالت حدی g تحت مقاومت (W_{t18}) و بارهای مختلف وارد بر روسازی (W_{t18}) رسم شده است. اگر تابع حالت حدی g کوچک‌تر از صفر باشد، مقدار W_{t18} کمتر از W_{18} شده و روسازی تخریب می‌شود. اگر مساحت قسمتی از تابع حالت حدی g که کوچک‌تر از صفر بوده را محاسبه کنیم، مقدار احتمال شکست روسازی (P_f) محاسبه می‌شود این ناحیه در شکل (۱) نشان داده شده است. اگر تابع توزیع تجمعی g را به دست آورده و مقدار صفر را در

شکل ۱. نمودار توزیع احتمال تابع حالت حدی g

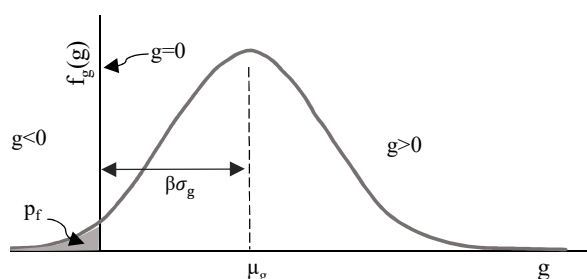


Fig. 1. Plot of probability distribution of limit state function (g)

آن قرار دهیم احتمال شکست روسازی (P_f) به دست می‌آید. با توجه به این‌که تابع حالت حدی g دارای توزیع نرمال بوده، محاسبه تابع توزیع تجمعی آن پیچیده است. به عنوان راه‌حل جایگزین می‌توان توزیع احتمال تابع حالت حدی g را تبدیل به استاندارد نرمال کرد. در رابطه (۴) این تبدیل انجام شده است.

$$G = \frac{g - \mu_g}{\sigma_g} \quad (4)$$

مقدار میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی g از طریق روابط (۲ و ۳) به دست می‌آید. حال با توجه به این‌که تابع حالت حدی g تبدیل به توزیع استاندارد نرمال شده است، می‌توان تابع توزیع تجمعی آن را در نقطه صفر محاسبه کرده و احتمال شکست روسازی (P_f) به دست آورد. در رابطه (۵) مقدار احتمال شکست روسازی محاسبه شده است.

همان انحراف معیار تابع حالت حدی g بوده و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. در آیین‌نامه ایران و روش آشتو یک مقدار ثابت برای S_0 پیشنهاد شده است. در صورتی که تمام عدم قطعیت در مدل از طریق همین متغیر در نظر گرفته می‌شود و فرض مقدار ثابت برای آن دقت در محاسبه احتمال شکست روسازی را کاهش می‌دهد. مقدار S_0 در روش آشتو با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده در این آزمایش پیشنهاد شده است. در صورتی که این مقدار با توجه به آب و هوا، ترافیک، چگونگی اجرا و وضعیت روسازی مسیرهای تحت آزمایش آشتو به دست آمده و ممکن است برای مسیرهای دیگر متفاوت باشد. در آیین‌نامه طراحی روسازی ایران نیز از مقدار پیشنهاد شده در روش آشتو استفاده شده و کار آماری روی مسیرهای ایران انجام نگرفته است. در روش پیشنهادی نیازی به در نظر گرفتن S_0 نیست زیرا مقدار انحراف معیار هر متغیر از طریق جمع‌آوری داده‌ها محاسبه شده و عدم قطعیت هر متغیر به‌طور مستقیم وارد تحلیل می‌شود. در این تحقیق نیز داده‌های واقعی از راه‌های ایران جمع‌آوری سپس مقادیر میانگین، انحراف معیار و توزیع احتمال هر متغیر به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ در سطح اطمینان ۹۵ درصد تعیین شد.

$$g = \log(w_{t18}) - \log(w_{18}) = [9.36 \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log[(4.2 - p_r)/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07] - \log[ADT \times T \times T_f \times D \times L \times 365 \times \frac{(1+r)^Y - 1}{r}] \quad (9)$$

مطابق توضیحات بالا روش طراحی مورد استفاده در آیین‌نامه ایران نواقصی داشته که در این پژوهش سعی در رفع آن شده است. به جای استفاده از روش FOSM که یکی از اولین و ساده‌ترین روش تحلیل قابلیت اعتماد بوده، می‌توان از روش‌های دقیق‌تری مانند FORM و Sampling استفاده کرد. روش Sampling دقت بیشتری از روش‌های FORM و FOSM داشته ولی هزینه محاسباتی بالاتری نیز دارد.

• برای استفاده از این روش باید متغیرهای W_{18} و W_{t18} توزیع احتمال لاگ‌نرمال داشته تا تابع حالت حدی g تبدیل به توزیع احتمال استاندارد نرمال شود. در صورتی که این متغیرها برای مسیرهایی با شرایط آب و هوایی، ترافیکی، وضعیت روسازی و خرابی متفاوت می‌تواند هرگونه توزیع احتمالی داشته باشد. در ادامه با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده در بخش ۴-۵ این تحقیق نشان داده شد که متغیرهای W_{18} و W_{t18} دارای توزیع لاگ‌نرمال نیستند. برای رفع این مشکل در روش پیشنهادی از تحلیل FORM و Sampling به جای روش FOSM استفاده شده است. در این روش‌ها متغیرهای طراحی می‌تواند هرگونه توزیع احتمالی داشته باشد برای تشخیص توزیع احتمال هر متغیر نیز داده‌های واقعی از راه‌های ایران جمع‌آوری شده سپس مشخصات و توزیع احتمال آن به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ در سطح اطمینان ۹۵ درصد به دست آمد. در نظر گرفتن فرض توزیع لاگ‌نرمال برای متغیرهای W_{18} و W_{t18} موجب کاهش دقت در محاسبات احتمال شکست شده و همان‌طور که نشان داده شد این متغیرها می‌توانند هرگونه توزیع احتمالی داشته باشند.

• برای محاسبه میانگین و انحراف معیار تابع حالت حدی g باید رابطه (۱) خطی باشد. اگر روابط محاسبه W_{18} و W_{t18} را در رابطه (۱) جایگذاری کرده، به رابطه (۹) می‌رسیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه (۹) غیرخطی است برای حل این مشکل در تحلیل FOSM تابع حالت حدی g را به کمک بسط تیلور خطی می‌کنیم. ولی استفاده از بسط تیلور و خطی سازی تابع حالت حدی دقت محاسبات را کاهش می‌دهد. در روش پیشنهادی از FORM و Sampling استفاده شده که روش FORM خطی سازی تابع حالت حدی را با دقت بیشتری نسبت به FOSM انجام می‌دهد. در Sampling و شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیاز به خطی سازی وجود ندارد و هرگونه تابع غیرخطی را می‌توان با دقت بالایی تحلیل کرد.

• برای در نظر گرفتن قابلیت اعتماد در طراحی از ضرب دو متغیر Z_R و S_0 استفاده شده که مطابق توضیحات قبل S_0

۳-۴- بار وارد شده بر روسازی

برای محاسبه بار وارد بر روسازی از رابطه (۱۰) استفاده شده است [1].

$$w_{18} = ADT \times T \times T_f \times D \times L \times 365 \times \left(\frac{(1+r)^Y - 1}{r} \right) \quad (10)$$

که در آن ADT^1 متوسط ترافیک روزانه، T درصد کامیون عبوری در ADT ، T_f ضریب بار هم‌ارز محور منفرد $8/2$ تنی (18 kip)، D ضریب توزیع ترافیک در هر جهت، L ضریب توزیع ترافیک در خط طراحی، Y دوره طراحی روسازی برحسب سال و r نرخ رشد سالیانه ترافیک است. به‌جز ADT و r بقیه متغیرها 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، دسته چهارم اتوبوس و دسته پنجم تریلرها و باربرهای بالاتر از سه محور را شامل می‌شود. تعداد وسایل نقلیه عبوری روزانه در هر کدام از دسته‌ها برای یک سال جمع‌آوری شده و توزیع احتمال مناسب برازش داده شد. برای محاسبه رشد ترافیک نیز از اطلاعات ترافیکی سال گذشته استفاده و رشد ترافیک به صورت روزانه برای هر دسته از وسایل نقلیه محاسبه شده است.

۴-۴- مقاومت روسازی

مقاومت روسازی در برابر بارهای وارد شده از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [1].

$$w_{18} = 9.36 \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log[(4.2 - p_t)/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07$$

در این رابطه SN^2 عدد سازه‌ای روسازی، P_t نشانه خدمت‌دهی نهایی و M_R ضریب برجهنگی مؤثر خاک بستر روسازی است. متغیرهای SN و M_R تغییرپذیر فرض شده و دارای توزیع احتمال است. برای محاسبه مدول الاستیسیته هر لایه ابتدا ضخامت لایه‌های روسازی توسط آزمایش GPR^3

مشخص شده سپس آزمایش FWD^4 روی قطعات روسازی انجام شده و به کمک نرم‌افزار $ELMOD$ مدول الاستیسیته هر لایه محاسبه شد [13]. متغیر SN به کمک رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$SN = SN_{eff} + \alpha_1 \times D \quad (12)$$

که در این رابطه α_1 ضریب قشر روکش، D مقدار ضخامت روکش موردنیاز برای رسیدن به سطح اطمینان مطلوب و SN_{eff}^5 عدد سازه‌ای مؤثر بوده که نشان دهنده وضعیت خرابی روسازی در طول عمر آن است. برای محاسبه SN_{eff} روابط زیادی پیشنهاد شده است. با بررسی تحقیقات پیشین مشاهده شد که روش $Rohde$ روشی مناسب در محاسبه این متغیر است [14-16]. محاسبات روش $Rohde$ در روابط (۱۳ و ۱۴) آمده است [17].

$$SIP = D_0 - D_{1.5Hp} \quad (13)$$

در این رابطه SIP^6 شاخص ساختاری روسازی، D_0 افت‌وخیز در مرکز صفحه‌ی بارگذاری در سطح تنش ۴۰ کیلو نیوتن (۹۰۰۰ پوند) ($\mu\text{microns}$)، $D_{1.5Hp}$ افت‌وخیز در فاصله ۱/۵ برابر Hp از مرکز صفحه بارگذاری در سطح تنش ۴۰ کیلو نیوتن (۹۰۰۰ پوند) ($\mu\text{microns}$) و Hp ضخامت کلی روسازی است.

$$SN_{eff} = K_1 \times SIP^{K_2} \times Hp^{K_3} \quad (14)$$

که در آن SN_{eff} عدد سازه‌ای مؤثر روسازی و K_1 ، K_2 و K_3 ضرایب رگرسیون بوده که در تحقیق $Rohde$ به ترتیب مقادیر ۰/۴۷۲۸، ۰/۴۸۱- و ۰/۷۵۸۱ برای روسازی انعطاف‌پذیر پیشنهاد شده است [17].

۵- نتایج و بحث

۵-۱- جمع‌آوری داده‌ها

در این بخش مطالعه‌ای موردی روی داده‌های محور قم-سلفچگان از شبکه‌های راه‌های ایران انجام شد. محور مورد

4. Falling Weight Deflectometer
5. Effective Structural Number
6. Structural Index of Pavement

1. Average daily traffic
2. Structural Number
3. Ground Penetrating Radar

آزمون اندرسون-دارلینگ توزیع احتمال‌های مختلف برای وسیله نقلیه دسته چهارم (۷۴) انجام شد و نتایج آن در جدول (۲) قابل مشاهده است. مطابق نتایج این جدول توزیع لجستیک کمترین آماره آزمون اندرسون-دارلینگ را داشته است و در نتیجه مناسب‌ترین توزیع احتمال برای ۷۴ است. نمودار هیستوگرام متغیر ۷۴ در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود توزیع احتمال لجستیک برازش خوبی بر داده‌ها دارد. این روند برای بقیه متغیرها نیز تکرار شد.

در جدول (۳) مقادیر میانگین، انحراف معیار، توزیع احتمال مناسب و نتایج آزمون اندرسون-دارلینگ متغیرهای r و ADT برای هر دسته از وسایل نقلیه ذکر شده است. مطابق جدول (۳) مناسب‌ترین توزیع احتمال برای متغیر r در تمامی دسته‌های وسایل نقلیه به‌جز دسته اول گامبل است. برای متغیر ADT توزیع احتمال‌های متفاوتی برای هر دسته از وسایل نقلیه به دست می‌آید.

بررسی دارای روسازی انعطاف‌پذیر و ۳ لایه است. طول محورهای مورد مطالعه حدود ۳۵/۸ کیلومتر است. آزمایش FWD در فواصل ۰/۲ کیلومتری انجام شده که مجموع ۱۷۶ نقطه از این محور برداشت شد. برای محاسبه ضخامت هر لایه نیز از آزمایش GPR استفاده شد. مشخصات داده‌های جمع‌آوری شده به‌طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است. برای محاسبه متوسط ترافیک روزانه (ADT) از داده‌های تردد شمار مرکز مدیریت راه‌های کشور ایران استفاده شد. در این داده‌ها وسایل نقلیه به ۵ دسته تقسیم شده است. تعداد وسایل نقلیه عبوری روزانه در هر کدام از دسته‌ها برای یک سال جمع‌آوری شد. برای محاسبه نرخ رشد سالیانه ترافیک (r) از اطلاعات ترافیکی سال قبل استفاده و رشد ترافیک به صورت روزانه برای هر دسته از وسایل نقلیه محاسبه شد. برای تشخیص بهترین توزیع احتمال متغیرهای r و ADT از آزمون اندرسون-دارلینگ با سطح اطمینان ۹۵ درصد در نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. چگونگی تشخیص مناسب‌ترین توزیع احتمال برای یک نمونه از متغیرها در ادامه بررسی شد.

جدول ۱. مشخصات محور

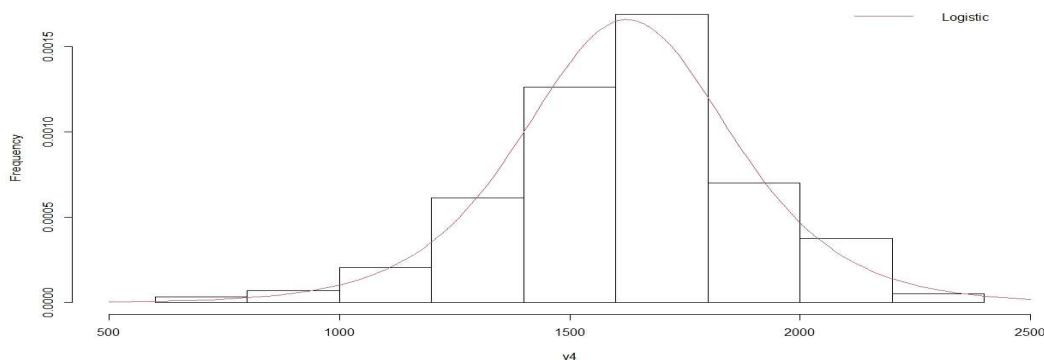
Route	route length (km)	number of points	testing intervals (m)	Asphalt thickness (cm)	Base thickness (cm)
Qom-Salafchegan	35.8	176	200	25	29

Table 1. Characteristics of route

جدول ۲ نتایج آزمون اندرسون-دارلینگ برای متغیر v_4

Probability distribution	Normal	Lognormal	Gumbel	Logistic	Weibull	Gama
Anderson Darling test Statistics	0.66	2.79	7.24	0.29	1.25	1.79
p-value	0.08	<0.005	<0.005	0.51	<0.01	<0.005

Table 2. Anderson-Darling test result for the v_4 variable

شکل ۲. نمودار هیستوگرام متغیر v_4 Fig. 2. Histogram of v_4 variableجدول ۳. مشخصات متغیرهای ADT و r

Parameter	Type of distribution	Mean value	Standard deviation	Anderson-Darling test Statistic	p-value
Average Daily Traffic (ADT)					
Passenger car and Pickup (v_1)	Gumbel	14248	4537	0.64	0.07
Minibus and Mini truck (v_2)	Gumbel	1649	569	0.6	0.11
Truck (v_3)	Gamma	500	137	0.31	0.47
Bus (v_4)	Logistic	1619	271.1	0.29	0.51
Trailer truck (v_5)	Logistic	950	243.7	0.466	0.206
Annual Growth Rate (r)					
Passenger car and Pickup (v_1)	Logistic	0.3	0.325	0.66	0.05
Minibus and Mini truck (v_2)	Gumbel	-0.3552	0.323	0.38	0.32
Truck (v_3)	Gumbel	0.05278	0.3693	0.3	0.5
Bus (v_4)	Gumbel	-0.3887	0.192	0.56	0.14
Trailer truck (v_5)	Gumbel	0.6578	0.7536	0.144	0.96

Table 3. Characteristics of ADT and r variables

مقادیر میانگین، انحراف معیار، نتایج آزمون اندرسون-دارلینگ و توزیع احتمال مناسب برای متغیرهای MR و SN_{eff} هر قطعه ارائه شده است. مطابق نتایج جدول (۴) مناسب‌ترین توزیع احتمال برای متغیر MR در تمامی قطعات لاگ‌نرمال بوده است. برای متغیر

با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده از آزمایش‌های FWD و GPR ، مدول الاستیسیته هر لایه از طریق نرم‌افزار $ELMOD$ محاسبه شد. مقدار SN_{eff} به کمک روش $Rohde$ که در بخش قبل توضیح داده شد، محاسبه شد. به وسیله روش CDA^1 محور مورد مطالعه به قطعات یکنواختی تقسیم شد [18]. در جدول (۴)

۱۰ سال آینده طراحی شد. در محاسبه تغییرات PSI تنها عوامل ترافیکی در نظر گرفته شده است به دلیل کمبود اطلاعات در این زمینه فرض شده که رس‌های تورم‌زا یا پدیده یخبندان در مسیر طراحی وجود ندارد. در صورت به دست آوردن اطلاعات در محاسبه عوامل رس‌های تورم‌زا و پدیده یخبندان می‌توان این متغیر را نیز به صورت تغییر پذیر و دارای عدم قطعیت در مدل محاسبه کرده و تغییرات PSI با توجه به آن در مدل‌سازی وارد نمود.

SN_{eff} نیز تمامی قطعات به جز قطعه سوم دارای توزیع احتمال گامبل هستند.

در طراحی روکش بعضی از متغیرها به صورت ثابت و بدون توزیع احتمال فرض شدند. مقادیر این متغیرها با توجه به آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران در جدول (۵) نشان داده شده است. محور قم-سلفچگان به صورت بزرگراه بوده و دارای دو خط عبوری در هر جهت است. مقدار ترافیک روزانه برای هر جهت به صورت جداگانه برداشت شده است. به دلیل ضعیف بودن روسازی و میزان ترافیک عبوری زیاد در این محور، ضخامت روکش با توجه ترافیک

جدول ۴. مشخصات متغیرهای M_R و SN_{eff} در هر قطعه

Parameter	Type of distribution	Mean value	Standard deviation	Anderson-Darling test Statistic	p-value
Effective roadbed soil resilient modulus (M _R)					
section 1	Lognormal	2307	1360	0.6	0.11
section 2	Lognormal	1240.7	463.3	0.58	0.12
section 3	Lognormal	1765	698.28	0.44	0.257
section 4	Lognormal	1652	1001	0.415	0.29
Effective structural number (SN _{eff})					
section 1	Gumbel	6.169	1.103	0.21	0.75
section 2	Gumbel	3.797	0.894	0.5	0.18
section 3	Lognormal	4.303	0.816	0.3	0.53
section 4	Gumbel	3.165	0.6194	0.42	0.28

Table 4. Characteristics of M_R and SN_{eff} variables

جدول ۵. متغیرهای ثابت در طراحی

Parameter	value	Description
year	10	-
Directional distribution factor (D)	1	Each direction was designed separately
Lane Distribution Factor (L)	0.9	Two lanes in each direction
Layer coefficients of overlay	0.44	-
Standard Normal deviation (Z _r)	-0.841	Freeways
Standard deviation (S _o)	0.35	-
Initial serviceability index (PSI ₁)	4.2	Flexible pavements
Terminal serviceability index (PSI ₂)	3	Freeways

Table 5. Deterministic variables

جدول (۷) ارائه شده است. مطابق جدول (۷) سطح اطمینان در روش پیشنهادی حدود ۶۰ درصد بوده و اختلاف ۲۰ درصدی با روش آشتو دارد. روش آشتو به صورت غیر محافظه کارانه طراحی را انجام داده و احتمال شکست روسازی در طول عمر آن را ۲۰ درصد در نظر می‌گیرد؛ در صورتی که این مقدار برای روش پیشنهادی حدود ۴۰ درصد است. این اختلاف به دلیل ضعف‌های موجود در روش آشتو (در بخش ۴-۲ به آن اشاره شد) و نیز در نظر نگرفتن تغییرپذیری برای پارامترها به وجود آمده است. در روش آشتو از So برای در نظر گرفتن تغییرپذیری کلیه متغیرها استفاده شده و یک مقدار ثابت نیز برای آن پیشنهاد شده است؛ ولی در روش پیشنهادی تغییرپذیری متغیرها از طریق جمع‌آوری داده‌ها و برازش توزیع احتمال مناسب در نظر گرفته می‌شود. این ضعف در طراحی آشتو موجب شده که روسازی در طول عمر و ترافیک کمتری از مقدار طراحی آن تخریب شود. با انجام سعی و خطا در روش پیشنهادی مقدار ضخامت روکش متناظر با سطح اطمینان ۸۰ درصد محاسبه و با نتایج روش آشتو

۲-۵- طراحی ضخامت موردنیاز روکش به روش آشتو
برای طراحی ضخامت روکش در روش آشتو تمامی متغیرها به صورت ثابت و بدون توزیع احتمال فرض شده و از مقدار میانگین هر متغیر استفاده شد. مقدار سطح اطمینان در این روش ۸۰ درصد فرض شده است. با انجام سعی و خطا مقدار عدد سازه‌ای موردنیاز (SN_{req}) و ضخامت روکش (D) محاسبه شد. نتایج طراحی روش آشتو در جدول (۶) ذکر شده است.

۳-۵- مقایسه نتایج روش پیشنهادی و آشتو

همان‌طور که اشاره شد، در روش پیشنهادی از تحلیل قابلیت اعتماد FORM و Sampling در نرم‌افزار Rtx استفاده شد. برای درستی‌آزمایی و بررسی دقت نرم‌افزار Rtx، شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیز در زبان برنامه‌نویسی R اجرا و نتایج آن با نتایج نرم‌افزار Rtx مقایسه شد که نتایج آن در بخش ۵-۵ قابل مشاهده است. از نتایج طراحی ضخامت روکش به روش آشتو جدول (۶) استفاده کرده و سطح اطمینان متناظر با هر قطعه در روش پیشنهادی محاسبه شد. نتایج مقایسه سطح اطمینان در

جدول ۶. نتایج طراحی روکش روش آشتو محور قم-سلفچگان

section	M_R (kg/cm ²)	SN_{req}	SN_{eff}	D (cm)
0_6.2	2307	4.92	6.169	0
6.4_19.8	7/1240	6.1	3.797	13.08
20_23.8	1765	5.41	4.3	6.28
24-35.8	1652	5.56	3.165	13.6

Table 6. AASHTO Design Procedure results in Qom-Salafchegan route

جدول ۷. مقایسه سطح اطمینان روش پیشنهادی با آشتو

section	D (cm)	AASHTO method	FORM	Sampling	
				Rtx	R
0_6.2	0	80%	59.10%	56%	55%
6.4_19.8	13.08	80%	62.40%	60%	58.40%
20_23.8	6.28	80%	63.10%	60%	58.50%
24-35.8	13.6	80%	60.50%	57.10%	55.80%

Table 7. Comparing reliability level AASHTO design Procedure with the proposed method

به صورت نرمال در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در بخش ۴-۱ و رابطه (۱) توضیح داده شد مطابق این فرض تابع حالت g نیز توزیع استاندارد نرمال خواهد داشت. برای بررسی این موضوع به کمک داده‌های جمع‌آوری شده در این تحقیق، شبیه‌سازی مونت‌کارلو در ۱۰۰,۰۰۰ نقطه انجام شده و مقدار لگاریتم متغیرهای W_{18} و W_{t18} به دست آمد. به‌وسیله آزمون اندرسون-دارلینگ نرمال بودن توزیع احتمال نتایج بررسی شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۹) توزیع احتمال متغیرهای W_{18} و W_{t18} از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند. در نتیجه تابع حالت حدی g توزیع استاندارد نرمال نداشته و نمی‌توان از

مقایسه گردید. مطابق جدول (۸) مقدار ضخامت روکش در روش آشتو حدوداً ۵۰ درصد کمتر از مقدار تعیین شده بر اساس روش پیشنهادی است. ضعف‌های موجود در روش آشتو (در بخش ۴-۲ به آن اشاره شد) و در نظر نگرفتن تغییرپذیری متغیرها موجب اختلاف زیاد در طراحی ضخامت روکش می‌شود. در نتیجه روسازی قبل از رسیدن به طول عمر طراحی تخریب شده و نیاز به تعمیر مجدد آن است.

۴-۵- بررسی توزیع احتمال W_{18} و W_{t18}

در روش آشتو توزیع احتمال لگاریتم متغیرهای W_{18} و W_{t18}

جدول ۸. مقایسه ضخامت روکش روش پیشنهادی با آشتو در سطح اطمینان ۸۰ درصد

section	AASHTO method	FORM	Sampling		Unit
			Rtx	R	
0_6.2	0	3.5	3.5	3.9	cm
6.4_19.8	13.08	22.4	22.1	22.7	cm
20_23.8	6.28	15	15	15.7	cm
24-35.8	13.6	23.7	23.6	24.3	cm

Table 8. Comparing require overlay thickness AASHTO design Procedure with proposed method in 80 percent reliability level

جدول ۹. نتایج آزمون اندرسون-دارلینگ در توزیع احتمال نرمال W_{18} و W_{t18}

Parameter	Anderson-Darling test Statistic	p-value	Accept or reject the normal probability distribution
W_{18}	123	<0.005	Rejected
W_{t18} section 1 (0-6.2km)	71	<0.005	Rejected
W_{t18} section 2 (6.4-19.8km)	156	<0.005	Rejected
W_{t18} section 3 (20-23.8km)	23	<0.005	Rejected
W_{t18} section 4 (24-35.8km)	18	<0.005	Rejected

Table 9. Investigation normality of the w_{t18} and w_{18} probability distribution

یکدیگر مقایسه شد همچنین برای بررسی دقت و درستی آزمایشی این روش‌ها در نرم‌افزار Rtx شبیه‌سازی مونت‌کارلو در زبان برنامه‌نویسی R انجام و نتایج در دو حالت مقایسه شده است. تحلیل‌های انجام‌گرفته در نرم‌افزار Rtx و زبان برنامه‌نویسی R برای ۱۰۰۰۰۰ بار تکرار شده است. مطابق جداول (۶ و ۷) نتایج روش $Sampling$ در نرم‌افزار Rtx و R اختلاف کمی با یکدیگر دارند. اختلاف روش $FORM$ و $Sampling$ بیشتر

رابطه (۵) برای محاسبه احتمال شکست روسازی استفاده کرد زیرا تابع توزیع تجمعی g دیگر به صورت استاندارد نرمال نیست.

۵-۵- مقایسه روش‌های قابلیت اعتماد در طراحی روکش

برای درستی‌آزمایی تحلیل‌های انجام‌گرفته علاوه بر روش $FORM$ از روش $Sampling$ نیز استفاده و نتایج دو روش با

ضخامت روکش را طراحی کرده در نتیجه طراحی را به صورت غیر محافظانه کارانه تری انجام می‌دهد.

- برای بررسی دقت نرم‌افزار Rtx نتایج آن با شبیه‌سازی مونت کارلو در زبان برنامه‌نویسی R مقایسه شد. مطابق نتایج به دست آمده اختلاف در این دو حالت کم بوده و نرم‌افزار Rtx احتمال شکست در طراحی ضخامت روکش را کمتر از زبان برنامه‌نویسی R به دست می‌آورد.

۷- مراجع

- [1] T. Officials, "AASHTO guide for design of pavement structures," *Washingt. DC Am. Assoc. State Highw. Transp. Off.*, 1993.
- [2] A. Maji and A. Das, "Reliability considerations of bituminous pavement design by mechanistic-empirical approach," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 19–31, 2008.
- [3] J. Q. Retherford and M. Mcdonald, "Reliability Methods Applicable to Mechanistic-Empirical Pavement Design Method," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2154, no. 1, pp. 130–137, 2010.
- [4] L. Design, V. P. Deshpande, I. D. Damjanovic, and P. Gardoni, "Effects of overlay designs on reliability of flexible pavements," vol. 2479, 2012.
- [5] D. M. Dilip, P. Ravi, and G. L. Sivakumar Babu, "System reliability analysis of flexible pavements," *J. Transp. Eng.*, vol. 139, no. 10, pp. 1001–1009, 2013.
- [6] K. Kalita and P. Rajbongshi, "Variability characterisation of input parameters in pavement performance evaluation," vol. 0629, 2015.
- [7] A. Maji, D. Singh, and H. Chawla, "Developing probabilistic approach for asphaltic overlay design by considering variability of input parameters," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2016.
- [8] P. R. T. Peddinti, B. Munwar Basha, and S. Saride, "System Reliability Framework for Design of Flexible Pavements," *J. Transp. Eng. Part B Pavements*, vol. 146, no. 3, p. 04020043, 2020.
- [9] M. Mahsuli and T. Haukaas, "Computer Program for Multimodel Reliability and Optimization Analysis," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 87–98, 2013.
- [10] H. Nasrazadani and M. Mahsuli, "Probabilistic

از حالت قبل بوده و روش FORM ضخامت روکش را با سطح اطمینان بیشتری طراحی می‌کند. دلیل این موضوع به ضعف‌های روش FORM برمی‌گردد. در روش FORM از بسط تیلور برای خطی سازی تابع حالت حدی استفاده می‌شود. هرچه تابع حالت حدی غیرخطی‌تر بوده محاسبات دقت کمتری داشته و اختلاف با روش Sampling بیشتر می‌شود. در مقابل این روش هزینه محاسباتی کمتری نسبت به Sampling دارد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی کفایت آیین‌نامه روسازی آسفالتی ایران در طراحی روسازی پرداخته شد. داده‌های ترافیک و وضعیت روسازی در محور قم-سلفچگان جمع‌آوری شده و مناسب‌ترین توزیع احتمال هر متغیر به کمک آزمون اندرسون-دارلینگ مشخص شد. برای رفع نواقص موجود در آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران روش جدیدی بر مبنای قابلیت اعتماد پیشنهاد شد. سپس نتایج دو روش با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج به دست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

- آیین‌نامه روسازی‌های آسفالتی ایران سطح اطمینان را حدود ۲۰ درصد بیشتر از روش پیشنهادی محاسبه می‌کند. در سطح اطمینان یکسان نیز ضخامت روکش به دست آمده در این آیین‌نامه حدود ۵۰ درصد کمتر از مقدار به دست آمده از روش پیشنهادی است. این اختلاف موجب شده که روسازی طراحی شده بر اساس این آیین‌نامه در عمر کمتری از مقدار طراحی تخریب شده و نیاز مجدد به عملیات تعمیر و نگهداری داشته باشد.
- در روش آشتو توزیع احتمال لگاریتم متغیرهای W_{118} و W_{18} به صورت نرمال در نظر گرفته شده است. با انجام آزمون اندرسون-دارلینگ روی داده‌های جمع‌آوری شده این فرض رد شده و این متغیرها توزیع نرمال ندارند.
- روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اعتماد با یکدیگر مقایسه و مشاهده شد که روش FORM با سطح اطمینان بیشتری نسبت به روش Sampling

- Abbasghorbani, "Protocol for FWD Data Collection at Network-Level Pavement Management in Iran," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2672, no. 40, pp. 68–77, 2018.
- [16] Z. Zhang, G. Claros, L. Manuel, and I. Damjanovic, "Evaluation of the Pavement Structural Condition at Network Level using Falling Weight Deflectometer (FWD) Data," *82nd Annu. Meet. Transp. Res. Board*, pp. 1–26, 2003.
- [17] G. T. Rohde, "Determining pavement structural number from FWD testing," *Transp. Res. Rec.*, no. 1448, 1994.
- [18] R. Misra and A. Das, "Identification of homogeneous sections from road data," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 229–233, 2003.
- Framework for Evaluating Community Resilience: Integration of Risk Models and Agent-Based Simulation," *J. Struct. Eng.*, vol. 146, no. 11, p. 04020250, 2020.
- [11] Patrianus Khristian Sumule and M. Mahsuli, "Probabilistic models, methods, and software for evaluating risk to civil infrastructure," vol. 2, no. July, p. 32, 2012.
- [12] Yang H. Huang, "Pavement Analysis and Design," *Education*, p. 775, 2004.
- [13] Dynatest International A/S, "Elmond 6: Quick Start Manual," vol. 27, no. 0.
- [14] A. L. Crook, S. R. Montgomery, and W. S. Guthrie, "Use of falling weight deflectometer data for network-level flexible pavement management," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2304, pp. 75–85, 2012.
- [15] N. Matini, N. Tabatabaee, and M.

Reliability analysis of designing overlay thickness according to Iran highway asphalt pavement code

Mehdi Ghodratabadi¹, Mohammad Yekrangnia^{2*}

1. Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2. Department of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

yekrangnia@sru.ac.ir

Abstract

In this research, adequacy of the method recommended by the Iran highway asphalt pavement code (Code 234) for pavement design is investigated. Pavement design in Iran highway asphalt pavement code is in accordance with the ASHTO method. Design variables in this Code are considered as deterministic and without probability distribution; while the Average Daily Traffic (ADT), the annual growth rate (r) and the variables related to resistance such as modulus of elasticity and thickness of each layer have many changes along a route despite the segmentation. As a result, pavements designed on this basis may have a shorter useful life than expected and be destroyed in less traffic or age than initial design. Iran highway asphalt pavement code uses a method similar to First Order Second Moment (FOSM) to consider the reliability in pavement design. FOSM is an old and simple method. This method has low accuracy in calculating confidence level, especially for nonlinear functions. There are more accurate methods such as First Order Reliability Method (FORM) and Sampling for reliability analysis that eliminate the disadvantages of FOSM method and perform reliability analysis more accurately for nonlinear functions. Therefore, it is better to consider the uncertainty of the variables and use accurate reliability methods to calculate the level of pavement reliability. A reliability-based method is proposed to improve the pavement design based on the Iran highway asphalt pavement code. To compare the two methods, traffic data and pavement condition of the Qom-Salafchegan route were collected. At first, the variables were considered deterministic and without probability distribution, and the overlay thickness was calculated at a confidence level of 80% based on code 234. Then the most appropriate probability distribution of variables was determined by the Anderson-Darling test. According to the thickness of the overlay obtained from the Iran highway asphalt pavement code, the confidence probability of each section was determined by the FORM and Sampling methods in the Rtx software and Monte Carlo simulation in the R programming language. Based on Code 234, the pavement reliability was approximately 20% higher than that of the proposed method. Furthermore, the required overlay thickness based on this code was about half of that determined according to the proposed method with an equal reliability level, which leads to destruction in less traffic and lifetime than the design value and needs to repair again. In the following different reliability methods are compared with each other. According to the result, the sampling method has a higher probability of failure and needs more required overlay thickness than the FORM method, therefore, leading to a more conservative overlay thickness design. To evaluate the accuracy of Rtx software, a Monte Carlo simulation is performed in the R programming language. It was concluded that Rtx results in the overlay design have a more reliability level than the R programming language. In the ASHTO method, the logarithm probability distribution of w_{18} and w_{18} variables is considered normal. This hypothesis was rejected by performing the Anderson-Darling test on the collected data and these variables do not have a normal distribution.

Keywords: Flexible pavement, Pavement maintenance and repair, Reliability method, Uncertainty, the Probability distribution.