



## پیش‌بینی زوال جاده‌های جنگلی با استفاده از زنجیره مارکوف (تحقیق موردی: جنگل غرب هراز)

شیرین احراری<sup>۱</sup>، اکبر نجفی<sup>۲\*</sup> و علی حسین‌زاده کاشان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ایران.  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران ایران.  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲)

### چکیده

شبکه جاده‌های جنگلی، تأثیر مهمی در تحقق اهداف مدیریتی در اکوسیستم‌های جنگلی دارند و با وجود اجرای طرح تنفس جنگل، حفاظت از آنها را نمی‌توان متوقف کرد. بنابراین به‌منظور اولویت‌بندی برنامه‌ریزی نگهداری، طراحی مدلی اطمینان‌بخش برای پیش‌بینی وضعیت خرابی روسازی جاده از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف این تحقیق، پیش‌بینی عملکرد روسازی جاده برای برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری از آن با استفاده از تئوری زنجیره مارکوف است. در پژوهش حاضر، ۱۸۵ قطعه جاده در جاده‌های جنگلی حوزه غرب هراز انتخاب و داده‌های وضعیت روسازی و خرابی‌های سطح جاده (چاله، شیار و بیرون‌زدگی)، شانه راه و شیروانی‌های خاک‌ریزی و خاک‌برداری جاده در قطعات مشخص شده در نقاط نمونه‌برداری در طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ اندازه‌گیری شد. کیفیت عملکردی جاده با طبقه‌بندی شاخص PCI و FRPCI ارزیابی شد و کیفیت روسازی در پنج گروه عالی، خوب، متوسط، بد و گسیخته طبقه‌بندی شد. پس از ارزیابی وضعیت جاری، وضعیت جاده با استفاده از زنجیره مارکوف پیش‌بینی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روند زوال جاده از کلاس عالی به خوب از روند تغییر آن از کلاس متوسط به ضعیف سریع‌تر است و با توجه به آنکه سرمایه‌های هنگفتی از مدیریت جنگل به ساخت و نگهداری از جاده اختصاص یافته است، لزوم تسریع در حفاظت و نگهداری از جاده به‌ویژه در جاده‌های باکیفیت مشخص می‌شود. براساس پژوهش انجام‌گرفته مدل زنجیره مارکوف قابلیت کافی را برای پیش‌بینی فرایند زوال جاده و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری از شبکه جاده دارد.

**واژه‌های کلیدی:** تعمیر و نگهداری جاده، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، زنجیره مارکوف، مدل‌سازی خرابی جاده، مدیریت روسازی جاده.

### مقدمه

باید با شناسایی همه عوامل مؤثر (ترافیک و شرایط محیط زیستی) در کاهش عملکرد جاده، برای رفع آنها اقدامات لازم را انجام داد. بدون عملیات نگهداری، قابلیت جاده‌ها در ارائه خدمات، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. این امر سبب افزایش هزینه‌های ماشین‌آلات می‌شود که ریسک مخاطرات طبیعی ناشی از جاده را در

برای دستیابی به فواید جنگل و مدیریت آنها به طراحی و نگهداری از شبکه جاده جنگلی نیاز است. به‌دلیل اهمیت شبکه جاده‌های جنگلی در تحقق اهداف مدیریتی در اکوسیستم‌های جنگلی، حفاظت از آنها را نمی‌توان متوقف کرد. با توجه به اهمیت این موضوع

گسترده در پیش‌بینی زوال جاده استفاده کرد. پیش‌بینی روند زوال روسازی جاده، مستلزم ارزیابی وضعیت کیفی جاده در دوره‌های زمانی مختلف است. این ارزیابی توسط شاخص‌های کیفیت روسازی بیان می‌شود. از جمله شاخص‌هایی که اغلب برای تعیین وضعیت کیفی جاده استفاده می‌شود می‌توان به شاخص خدمت‌پذیری<sup>۱</sup> (PSI) و شاخص کیفیت روسازی<sup>۲</sup> (PCI) اشاره کرد. در این تحقیق از شاخص PCI و شاخص توسعه‌داده‌شده برای شبکه جاده‌های جنگلی<sup>۳</sup> (FRPCI) (Heydari et al., 2018) به‌منظور ارزیابی کیفیت روسازی جاده استفاده شد. نتایج پژوهش‌های Heydari et al. (2018) نشان داد که استفاده از شاخص FRPCI دقت بیشتری از شاخص‌های دیگر در ارزیابی وضعیت روسازی جاده‌های جنگلی دارد، بنابراین می‌توان استفاده از این شاخص را به مجریان جنگل‌ها و همچنین دفتر مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به‌منظور حفظ و نگهداری از جاده‌های جنگلی پیشنهاد داد. با توجه به اقتصاد تک‌محصولی کشور، نوسان‌های شدید قیمت نفت و دیگر مشکلات اقتصادی، به نظر می‌رسد که در سال‌های آینده نتوان بودجه‌های چشمگیری را به جاده‌سازی و گسترش آن اختصاص داد. از این‌رو با توجه به محدودیت‌های منابع مالی و فناوری باید با صرف هزینه کمتر در حفظ و نگهداری جاده‌های موجود و قابلیت عبور و مرور آنها اقدام کرد. بر این اساس، برنامه‌ریزی دقیق زمانی و مکانی با هدف تخصیص بودجه و اولویت‌بندی برنامه‌ریزی نگهداری و بازسازی از جاده‌های جنگلی ضرورت می‌یابد؛ چراکه اگر جاده در زمان لازم تعمیر و بازسازی شود، از خرابی کامل آن جلوگیری و تا حد زیادی در هزینه‌ها صرفه‌جویی خواهد شد. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تا کنون در زمینه بررسی زوال روسازی جاده‌های جنگلی و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری از

پی خواهد داشت. از این‌رو سرمایه‌گذاری‌های اقتصادی برای نگهداری از جاده در ارائه عملکرد صحیح آن ضرورت دارد. محدودیت منابع مالی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، سبب افزایش تقاضا برای استفاده مطلوب از بودجه‌های تعمیر و نگهداری شده است (Worm & Van Harten, 1996). از این‌رو مهندسان جاده همواره در پی روش‌های ارزان‌تر برای به حداقل رساندن هزینه‌های عملیات نگهداری از جاده بوده‌اند تا در کنار افزایش عمر مفید جاده، در هزینه‌ها صرفه‌جویی کنند (Labi & Sinha, 2003). در بخش جنگل نیز با توجه به طرح تنفس و کمبود منابع و اعتبارات لازم، مدیران و بهره‌برداران به‌سمت استفاده بهینه از منابع مالی در بخش تعمیر و نگهداری از شبکه جاده متمایل شده‌اند. از این‌رو برای برنامه‌ریزی و صرف مؤثر بودجه، باید رفتارهای آینده روسازی جاده پیش‌بینی شود. بدین منظور از مدل‌های پیش‌بینی وضعیت جاده استفاده می‌شود که از مهم‌ترین مؤلفه‌های سیستم مدیریت روسازی است (Meneses & Ferreira, 2013). مدل‌های به‌کاررفته در پیش‌بینی وضعیت آینده جاده‌ها، اغلب مدل‌های قطعی و مدل‌های تصادفی هستند (Heydari et al., 2018). از آنجا که متغیرهای زیادی بر عملکرد جاده اثرگذارند، تعیین کارایی و عملکرد جاده و پیش‌بینی ساختار آن با استفاده از مدل‌های قطعی دشوار است (Li et al., 2014)؛ از این‌رو محققان زیادی اشکال مختلفی از مدل‌های تصادفی را برای پیش‌بینی وضعیت آینده جاده بنیان نهاده‌اند (Abaza, 2017) که می‌توانند عدم اطمینان و اتفاقی بودن فرایند زوال جاده را به‌دلیل بار ترافیکی و شرایط محیطی به‌درستی نشان دهند. از جمله روش‌های پیش‌بینی احتمالاتی، فرایند مارکوف است که با روش‌های ساده ریاضی، حل احتمالات مربوط به فرایندهای وابسته را آسان کرده است. زنجیره مارکوف حالت خاصی از فرایند مارکوف است که مشخصه زمان و وضعیت در آن گسسته است و می‌توان از آن به‌صورت مجموعه‌ای از تغییر حالت‌ها براساس احتمالات قطعی به‌طور

1. Pavement Serviceability Index
2. Pavement Condition Index
3. Forest Road Pavement Condition Index

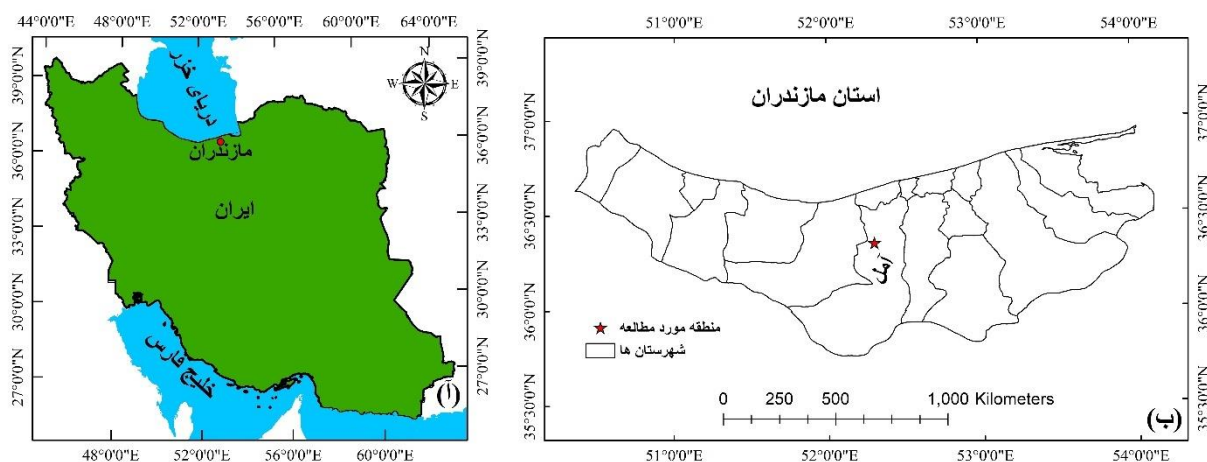
تحقیقات در زمینه بزرگراه‌ها، فرودگاه‌ها و جاده‌های آسفالته است. از این رو پیش از برنامه‌ریزی، طراحی مدلی مطمئن برای پیش‌بینی وضعیت روسازی بسیار ارزشمند خواهد بود. این تحقیق با استفاده از تئوری زنجیره مارکوف مدل زوال جاده را با هدف پیش‌بینی عملکرد آن به منظور برنامه‌ریزی مدیریت تعمیر و نگهداری از جاده پیشنهاد می‌کند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه پژوهش

به منظور اجرای تحقیق و ارزیابی مدل توسعه داده شده‌ی پیش‌بینی، حدود ۵۰ کیلومتر از جاده‌های جنگلی شمال کشور در حوزه غرب هراز در شهرستان آمل انتخاب شد و وضعیت خرابی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. منطقه پژوهش بین عرض جغرافیایی  $36^{\circ}39'22''$  و  $36^{\circ}41'18''$  شمالی و طول جغرافیایی  $52^{\circ}30'58''$  و  $52^{\circ}22'91''$  شرقی در دامنه ارتفاعی ۸۰۰-۱۰۰ متر از سطح دریا، با متوسط بارندگی سالانه ۸۶۷ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است (شکل ۱). اقلیم منطقه به روش دومارتن مرطوب با ضریب خشکی ۲۶ و ضریب رطوبتی ۸۱/۴ است.

روسازی در ایران تحقیقات جامعی صورت نگرفته است. بیشتر پژوهش‌ها در داخل کشور درباره تولید رسوب در جاده‌های جنگلی است. در خصوص بررسی زوال روسازی، (Nasiri et al. (2012 به بررسی اثر عملیات خروج چوب‌آلات در بروز شیارشدگی در روسازی شبکه جاده‌های جنگلی پرداخت و تأثیر معنادار عملیات چوبکشی بر شیارشدگی شبکه جاده‌های جنگلی را نشان داد. (Heidari et al. (2018 روند زوال روسازی شبکه جاده‌های جنگلی شمال کشور در حوزه غرب هراز را با استفاده از تکنیک‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون لجیستیک مدل‌سازی کردند و دریافتند که هر دو مدل از کارایی مناسبی در پیش‌بینی روند زوال روسازی شبکه جاده برخوردارند. (Ghajar et al. (2019 به بررسی اثرهای سایه‌اندازی درختان بر برخی شاخص‌های تخریب روسازی جاده جنگلی (مقطع عرضی و زهکشی کنار جاده‌ای نامناسب، کنگره‌ای شدن، تولید گردوغبار، اندازه چاله‌ها و شیارها و سستی توده خاک) در حوزه آبخیز ۱۲ چفرود استان گیلان پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که حدود نیمی از شاخص‌های بررسی شده، تفاوت معنی‌داری بین مناطق سایه و غیرسایه داشتند، اما متغیر تردد در روند کاهش یا افزایشی در شدت اثر سایه بر کیفیت روسازی جاده اثرگذار نبود. در خصوص منابع خارجی هم بیشتر



شکل ۱- منطقه تحقیق

روسازی، تاریخچه تعمیر و نگهداری و بارگذاری ترافیک به قطعات متعددی تقسیم شدند. جدول ۱ مشخصات جاده‌های تحت بررسی را نشان می‌دهد.

شبکه جاده بررسی شده در پنج سری آالشروود، زنگال‌دره، سنگ درکا و همسوا قرار دارد. هر سری از جاده‌ها از نظر سن، جنس، نوع مصالح، تاریخچه ساخت جاده، درجه و نوع کاربری جاده، ساختار

جدول ۱- مشخصات کلی جاده‌های جنگلی حوزه غرب هراز

سری	متوسط شیب جاده (درصد)	متوسط درجه پیچ جاده	عرض شانه (متر)	متوسط بارندگی (میلی‌متر)	نوع مصالح	تاریخ آخرین مرمت (سال)	سن جاده (سال)	ضخامت روسازی (سانتی‌متر)	تراфик متوسط روزانه (در یک سال)	ریزش (متر در کیلومتر)	عرض جاده (متر)	حجم برداشت (متر مکعب)
آالشروود	۹	۸۰	۰/۵	۸۰۰	رودخانه‌ای	۰/۶	۳۹	۸۰-۱۰۰	۸۴۸	۳۲	۵/۵	۲۴۵۰
زنگال‌دره	۱۱	۷۰	۰/۶	۸۸۰	مخلوط	۱	۳۵	۱۲۰-۱۸۰	۷۳۳	۲۷	۵	۲۰۲۶
سنگ درکا	۱۳	۱۰۰	۰/۶	۹۴۰	مخلوط	۲	۳۳	۱۲۰-۱۵۰	۷۳۳	۲۷	۵	۲۰۳۵
انگتارود	۱۶	۱۸۰	۰	۹۷۰	رودخانه‌ای	۴	۳۰	۸۰-۱۰۰	۷۴۱	۵۲	۴	۱۱۶۷
همسوا	۱۲	۸۰	۰/۳	۸۵۰	کوهی	۳	۳۷	۱۰۰-۱۲۰	۹۱۹	۴۱	۴/۵	۲۰۳۵

### شیوه اجرای پژوهش

این پژوهش با آماربرداری از شبکه جاده جنگلی و تعیین مدل زوال با استفاده از شاخص PCI و FRPCI صورت گرفت. در سال ۱۳۹۴ تعداد ۱۸۵ قطعه در شبکه جاده جنگلی حوزه غرب هراز در شهرستان آمل با توجه به توپوگرافی، پیچ، محل دیو، تقاطع، وجود زهکش، تغییر ناگهانی جهت و شیب، وجود معدن و دیگر عوامل در شبکه جاده جنگلی انتخاب شدند. روش آماربرداری به صورت منظم تصادفی و طول قطعه‌ها با توجه به مشخصات ذکر شده حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر به دست آمد. برای انتخاب نقاط شروع آماربرداری در سال ۱۳۹۷ به منظور پیش‌بینی روند زوال آن در سال‌های آتی، پژوهشگران با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در طول مسیر حرکت کردند و بعد از تطبیق مختصات جغرافیایی وارد شده در دستگاه با نقطه مورد نظر، نقطه آغازین

آماربرداری تعیین شد. سپس یک ترانسکت خطی عمود بر جاده در نظر گرفته شده و ترانسکت‌های بعدی با فاصله ۲۰ متر از یکدیگر، روی جاده تشکیل شد (Heydari et al., 2016) و این کار تا محل بسته شدن قطعه ادامه پیدا کرد. در هر ترانسکت با توجه به حریم ۱۰ متری از هر طرف، اطلاعات مورد نظر مانند شیب طولی، جهت جغرافیایی، ضخامت روسازی، ارتفاع از سطح دریا، درصد تاج‌پوشش روی جاده، وضعیت کمی و کیفی کانال کناری (پر بودن کانال و عمق آن)، بررسی وضعیت زهکشی جاده، وضعیت ترانشه، ریزش جاده به دره، کانال و همچنین خرابی‌های سطح جاده (چاله، بیرون‌زدگی و شیارشدگی)، گالی‌ها و خارج شدن جاده از شکل خود بررسی شد (Heidari et al., 2016). برای ارزیابی شرایط جاده سیستم‌های طبقه‌بندی متعددی ایجاد شده‌اند. در این تحقیق کیفیت عملکردی جاده با

شاخص PCI و شاخص FRPCI اندازه‌گیری شد (جدول ۲). در این طبقه‌بندی جاده‌ها تا زمانی که اندازه عددی طبقه‌بندی به ۱ برسد قابلیت سرویس‌دهی دارند.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص PCI با استفاده از روش FHWA

شرح وضعیت جاده	PCI	طبقه‌بندی
وضعیت گسیخته، جاده قابلیت عبور و مرور ندارد، نیازمند عملیات اصلاحی	۰-۲۰	۱
وضعیت بد، تخریب، فقدان قطعات پیشرفته، نیازمند نگهداری اساسی	۲۰-۴۰	۲
وضعیت نامناسب، ترک‌خوردگی، نیازمند بازسازی کم	۴۰-۵۵	۳
وضعیت خوب، خرابی‌های کم، نیازمند نگهداری کم	۵۵-۷۰	۴
وضعیت عالی، شرایط جدید، نبود خرابی شایان توجه	۷۰-۱۰۰	۵

$$P_{ij} = n_{ij} / n_i$$

رابطه ۱

که در آن  $n_{ij}$  تعداد گذارها از حالت  $i$  به حالت  $j$  در دوره زمانی مشخص و  $n_i$  تعداد کل عناصر جاده در حالت  $i$  قبل از گذار آن است. براساس طبقه‌بندی شاخص FRPCI سطح شبکه جاده به پنج کلاسه تقسیم می‌شود: ۱. عالی، ۲. خوب، ۳. بد، ۴. ضعیف، و ۵. گسسته. احتمال گذار در ماتریس نتیجه تقسیم عددی قطعات جاده که در وضعیت عالی باقی مانده‌اند به تعداد کل قطعات جاده بعد از یک دوره کامل بدون هیچ‌گونه عملیات نگهداری است. عناصر دیگر هم براساس قانون مشابه با مقایسه تغییر در شرایط قطعات بین دو بازرسی متوالی بدون عملیات نگهداری به دست می‌آید. حالت اولیه جاده با ماتریس بردار اولیه  $IP_0$  براساس مقدار شاخص شرایط جاده در سال اولیه بیان می‌شود. ماتریکس  $IP_0$  براساس رابطه ۲ فرموله می‌شود:

$$IP_0 = [V1 \quad V2 \quad V3 \quad V4] \quad \text{رابطه ۲}$$

بردارهای این ماتریس درصد قطعات جاده هستند که در وضعیت عالی، خوب، بد، ضعیف و گسسته قرار گرفته‌اند. با معلوم بودن  $IP_0$  بردار شرایط آینده جاده ( $FP_t$ ) بعد از یک دوره گذار  $t$  از رابطه ۳ به دست

- مدل زوال

مدل زوال جاده، نوعی رویکرد ریاضی است که می‌توان از آن برای پیش‌بینی چگونگی فرایند زوال جاده استفاده کرد. مدل به وضعیت فعلی جاده، عوامل زوال و عملیات نگهداری قبلی بستگی دارد. به‌منظور مدل‌سازی روند زوال جاده با زمان باید یک ماتریس احتمال گذار<sup>۱</sup> (TPM) با مرتبه  $n \times n$  تشکیل شود که در آن  $n$  تعداد حالت‌های وضعیت جاده است. سطر اول معرف بهترین وضعیت جاده و سطر  $n$  معرف وضعیت بحرانی آن است که عدد ۱ است و نشان‌دهنده حالتی است که جاده بیشتر از آن تخریب نمی‌شود، مگر آنکه عملیات بازسازی و نگهداری در آن انجام گیرد. این ماتریس شامل همه اطلاعات لازم برای مدل‌سازی حرکت فرایند در میان حالت‌های کیفی جاده است. احتمالات گذار ( $p_{ij}$ ) در جایگاه هر درآیه ماتریس نشان‌دهنده احتمال نسبت شبکه در وضعیت  $i$  است که در یک دوره کاری که شامل یک سال ترافیکی و اثرهای محیط زیستی است به وضعیت  $j$  تنزل می‌کند (Abaza et al., 2004). احتمال گذار  $p_{ij}$  در عناصر جاده از حالت  $i$  به  $j$  را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ به دست آورد:

#### 1. Transition Probability Matrix

می‌آید:

اکسل ۲۰۱۸ رسم شد.

$$FP_t = IP_0 \times TPM$$

رابطه ۳

## نتایج

در این پژوهش، مدل زوال جاده با استفاده از شاخص‌های کیفی روسازی جاده (FRPCI و PCI) تشکیل شد. جدول‌های ۳ و ۴، تعداد قطعات جاده در کیفیت‌های مختلف را برای دو شاخص PCI و FRPCI در دو دوره زمانی آماربرداری نشان می‌دهد. به منظور محاسبه ماتریس احتمال گذار، از داده‌های مربوط به شاخص‌های کیفی روسازی استفاده شد. جدول ۵، تعداد حالت‌های انتقال از حالت‌های  $i$  به  $z$  و تعداد حالت‌های متعلق به حالت  $Am$  را برای دو شاخص PCI و FRPCI نشان می‌دهد. داده‌های اصلی پیش‌بینی‌شده کیفیت جاده برحسب بردار سطری احتمال انتقال حالت‌ها، ( $P_{ij}$ ) محاسبه شد.

برای ساختن مدل، مجموعه داده‌های مبین کیفیت جاده با شاخص PCI و FRPCI در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ استفاده شدند. برای تشکیل جدول احتمالات گذار، تعداد حالت‌های گذار یافته کیفیت‌های مختلف شبکه جاده برای شاخص PCI و FRPCI در سال ۱۳۹۴ که به هر کدام از این وضعیت‌ها در سال ۱۳۹۷ تبدیل شده‌اند محاسبه شد. آن‌گاه با توجه به داده‌های موجود در جدول حالت‌های گذار، ماتریس احتمال گذار با مرتبه  $5 \times 5$  تشکیل شد. از حاصل ضرب ماتریس بردار اولیه در ماتریس احتمال گذار، ماتریس احتمال حالت‌های کیفی پنج‌گانه جاده در سال‌های مختلف به دست آمد. همه محاسبات مربوط به ضرب ماتریس‌ها در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۸ انجام گرفت و نمودار و تحلیل‌های آن در نرم‌افزار

جدول ۳- تعداد قطعات جاده در کیفیت‌های مختلف برای شاخص PCI در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷

سال	کیفیت				
	عالی	خوب	متوسط	بد	گسیخته
سال ۱۳۹۴	۳	۱۱	۴۶	۲۸	۲
سال ۱۳۹۷	۲	۵	۶	۴۲	۱۳

جدول ۴- تعداد قطعات جاده در کیفیت‌های مختلف برای شاخص FRPCI در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷

سال	کیفیت				
	عالی	خوب	متوسط	بد	گسیخته
سال ۱۳۹۴	۱۱	۳۴	۱۹	۳	۰
سال ۱۳۹۷	۴	۱۲	۲۶	۳۷	۱۵

(۱۳۹۴) به حالت‌های کیفی دیگر در آماربرداری ثانویه (۱۳۹۷) از شبکه جاده گذار کرده‌اند، محاسبه شد (جدول ۵). مقدار آرایه احتمال گذار برای هر وضعیت کیفی  $P_{ij}$  از تقسیم تعداد کل قطعاتی که از وضعیت  $i$

برای تشکیل ماتریس احتمال گذار برای هر یک از شاخص‌های PCI و FRPCI، در ابتدا آرایه شمارش فراوانی یعنی تعداد قطعاتی که در حالت‌های کیفی پنج‌گانه در دوره زمانی آماربرداری اولیه از شبکه جاده

دارند برابر ۸ است. بنابراین مقدار آرایه احتمال انتقال  $P_{12}$  از تقسیم ۲ بر ۸ به دست می‌آید. نتایج حاصل از ماتریس احتمال گذار برای دو شاخص PCI و FRPCI در جدول ۶ آمده است.

به وضعیت  $Z$  تبدیل شده‌اند، بر تعداد کل قطعات در وضعیت  $i$  در سال شروع به دست آمد. برای مثال برای شاخص PCI تعداد قطعاتی که در سال ۱۳۹۴ از وضعیت عالی به وضعیت خوب انتقال یافته‌اند برابر ۲ و تعداد کل قطعاتی که در این سال در وضعیت عالی قرار

جدول ۵- تعداد حالت‌های گذار برای شاخص‌های PCI و FRPCI در دوره زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷

PCI						کیفیت قطعات	FRPCI					تعداد کل
کیفیت قطعات							کیفیت قطعات					
تعداد کل	گسیخته	بد	متوسط	خوب	عالی	کیفیت قطعات	عالی	خوب	متوسط	بد	گسیخته	تعداد کل
۸	۱	۰	۲	۲	۳	عالی	۴	۷	۱	۱۰	۱	۲۳
۲۷	۴	۱۶	۷	۰	۰	خوب	۰	۹	۲۲	۶۷	۱	۹۹
۱۰۱	۱۸	۸۰	۳	۰	۰	متوسط	۰	۰	۴	۲۷	۰	۳۱
۳۰	۲۱	۹	۰	۰	۰	بد	۰	۰	۰	۱	۱۲	۱۳
۳	۳	۰	۰	۰	۰	گسیخته	۰	۰	۰	۰	۳	۳

جدول ۶- ماتریس احتمال گذار کیفیت‌های مختلف شبکه جاده برای شاخص‌های PCI و FRPCI در دوره زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷

PCI					کیفیت قطعات	FRPCI				
کیفیت قطعات						کیفیت قطعات				
گسیخته	بد	متوسط	خوب	عالی	کیفیت قطعات	عالی	خوب	متوسط	بد	گسیخته
۰/۱۲۵	۰	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۷۵	عالی	۰/۱۷۳	۰/۳۰۴	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳
۰/۱۴۸۱	۰/۵۹۲	۰/۱۱۱	۰/۱۴۸	۰	خوب	۰	۰/۰۹۰۹	۰/۲۲۲	۰/۶۷۶۷	۰/۰۱۰۱
۰/۱۷۸	۰/۷۹۲۰	۰/۰۲۹۷	۰	۰	متوسط	۰	۰	۰/۱۲۹۰	۰/۸۷۰۹	۰
۱	۰	۰	۰	۰	بد	۰	۰	۰	۰/۰۷۶۹	۰/۹۲۳۰
۱	۰	۰	۰	۰	گسیخته	۰	۰	۰	۰	۱

که از آماربرداری‌های مربوط به شبکه جاده در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ به دست آمد، استفاده شد. با توجه به حالت‌های مشخص شده در جدول ۵، ماتریس احتمال گذار برای حالت‌های کیفی مختلف برای شاخص PCI و شاخص FRPCI به صورت زیر به دست آمدند:

#### -پیش‌بینی کیفیت شبکه جاده

به منظور پیش‌بینی کیفیت شبکه جاده جنگلی در ده سال آینده از حاصل ضرب ماتریس بردار اولیه که بیانگر احتمال کیفی قطعات جاده در حالت‌های مختلف در سال شروع آماربرداری یعنی سال ۱۳۹۴ است در ماتریس ترانهاده احتمال گذار که از داده‌های جدول احتمال گذار برای دو شاخص PCI و FRPCI

$\begin{pmatrix} 0/375 & 0/25 & 0/25 & 0 & 0/125 \\ 0 & 0/148 & 0/111 & 0/592 & 0/148 \\ 0 & 0 & 0/029 & 0/792 & 0/178 \\ 0 & 0 & 0 & 0/3 & 0/7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0/1360 \\ 0/5857 \\ 0/1834 \\ 0/07692 \\ 0/01777 \\ 0/1360 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} 0/1739 & 0/3043 & 0/04347 & 0/4347 & 0/4347 \\ 0 & 0/0909 & 0/2222 & 0/6767 & 0/0101 \\ 0 & 0 & 0/12903 & 0/87096 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0/07692 & 0/92307 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0/47337 \\ 0/159763 \\ 0/597633 \\ 0/177515 \\ 0/017751 \end{pmatrix}$

سال تخمین است. نتایج حاصل از برآورد حالت کیفی جاده برای شاخص‌های PCI و FRPCI در سال‌های مختلف در جدول ۷ آورده شده است.

برای به‌دست آوردن احتمال کیفیت جاده در سال‌های مختلف، ماتریس ترانزاده احتمال گذار در ماتریس بردار اولیه ضرب شد. نتایج حاصل از ماتریس‌ها به توان آن بستگی دارد که نشان‌دهنده

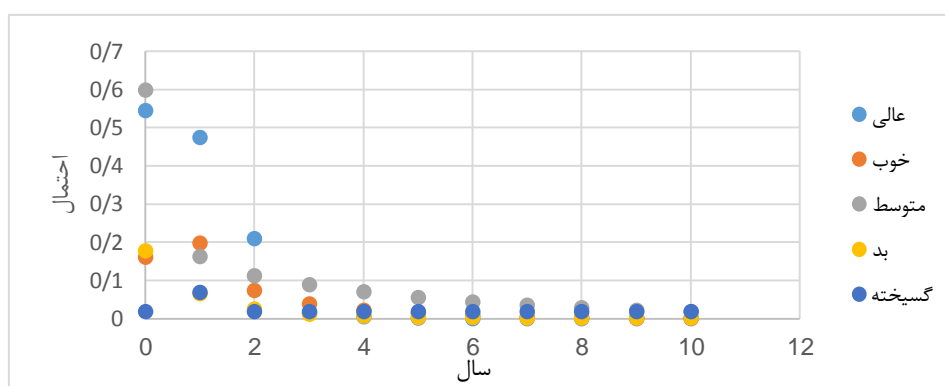
جدول ۷- نتایج برآورد حالت کیفی جاده برای شاخص‌های PCI و FRPCI در دوره زمانی ده‌ساله

سال	PCI					سال	FRPCI				
	کیفیت قطعات						کیفیت قطعات				
	عالی	خوب	متوسط	بد	گسیخته		عالی	خوب	متوسط	بد	گسیخته
اول	0/2093	0/1978	0/1615	0/0657	0/0178	اول	0/0237	0/0947	0/1598	0/6213	0/1006
دوم	0/543	0/0736	0/1125	0/0247	0/0178	دوم	0/0041	0/0174	0/0322	0/4336	0/0836
سوم	0/0144	0/0383	0/0883	0/0109	0/0178	سوم	0/0007	0/0043	0/0068	0/0314	0/783
چهارم	0/0039	0/0221	0/0699	0/0057	0/1780	چهارم	0/0001	0/0012	0/0015	0/2333	0/0736
پنجم	0/0011	0/0130	0/0554	0/0034	0/0178	پنجم	0	0/0004	0/0003	0/1772	0/0693
ششم	0/0003	0/0077	0/4380	0/0022	0/0178	ششم	0	0/0001	0/0001	0/1373	0/0653
هفتم	0/0001	0/0046	0/0347	0/0015	0/0178	هفتم	0	0	0	0/1082	0/0617
هشتم	0	0/0027	0/0275	0/0010	0/0178	هشتم	0	0	0	0/0867	0/0583
نهم	0	0/0160	0/0218	0/0007	0/0178	نهم	0	0	0	0/0704	0/0552
دهم	0	0/0009	0/0173	0/0005	0/0178	دهم	0	0	0	0/0579	0/0523

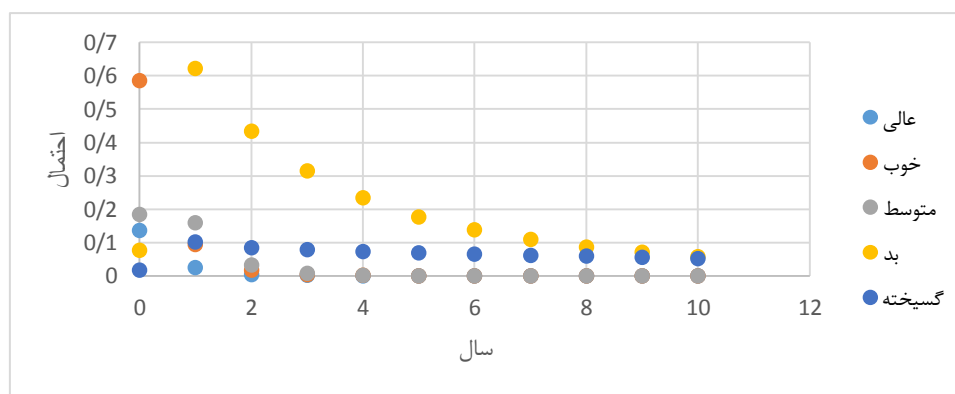


که دلیل افزایش آن خرابی و تبدیل قطعات با کیفیت‌های عالی، خوب و متوسط به وضعیت بد است و سپس به دلیل خرابی بیشتر قطعات و تبدیل شدن به وضعیت گسیخته، نمودار افقی بیانگر سال‌های پیش‌بینی و نمودار عمودی نشان‌دهنده احتمال قرار گرفتن قطعات در حالت‌های کیفی مختلف است و نقاط رنگی بیانگر حالت‌های کیفی مختلف هستند. از نمودار می‌توان مشاهده کرد که احتمال قرارگیری قطعات در وضعیت‌های عالی، خوب و متوسط با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در انتهای سال تخمین (۲۰۲۵) درصد احتمال کیفیت قطعات در حالت‌های عالی، خوب و متوسط نزدیک به صفر و حتی صفر خواهد شد. علت‌های اصلی این کاهش، ترافیک، شرایط آب‌وهوایی متغیر و نگهداری نکردن از جاده است. تا سال ۱۳۹۵ براساس نتایج، درصد احتمال قرارگیری قطعات در وضعیت بد، روند صعودی و بعد از آن روند نزولی دارد.

نتایج حاصل از برآورد درصد احتمال قرارگیری قطعات جاده در حالت‌های کیفی مختلف با استفاده از شاخص‌های PCI و FRPCI در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. نمودار افقی بیانگر سال‌های پیش‌بینی و نمودار عمودی نشان‌دهنده احتمال قرار گرفتن قطعات در حالت‌های کیفی مختلف است و نقاط رنگی بیانگر حالت‌های کیفی مختلف هستند. از نمودار می‌توان مشاهده کرد که احتمال قرارگیری قطعات در وضعیت‌های عالی، خوب و متوسط با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در انتهای سال تخمین (۲۰۲۵) درصد احتمال کیفیت قطعات در حالت‌های عالی، خوب و متوسط نزدیک به صفر و حتی صفر خواهد شد. علت‌های اصلی این کاهش، ترافیک، شرایط آب‌وهوایی متغیر و نگهداری نکردن از جاده است. تا سال ۱۳۹۵ براساس نتایج، درصد احتمال قرارگیری قطعات در وضعیت بد، روند صعودی و بعد از آن روند نزولی دارد.



شکل ۳- احتمال کیفی قطعات جاده در سال‌های مختلف بدون عملیات نگهداری (PCI)



شکل ۴- احتمال کیفی قطعات جاده در سال‌های مختلف بدون عملیات نگهداری (FRPCI)

## بحث

شبکه جاده جنگلی از اصلی‌ترین ارکان مدیریت جنگل‌هاست و همواره مسائل فنی و اقتصادی آن توسط کارشناسان بررسی شده است. احداث و نگهداری از شبکه جاده‌های جنگلی، سرمایه‌هنگفتی از بودجه‌های اقتصادی را به خود اختصاص داده است. از این‌رو مهندسان همواره درصدد یافتن راه‌های مقرون‌به‌صرفه برای احداث و نگهداری از شبکه جاده‌ها بوده‌اند. در سه دهه گذشته، روش زنجیره مارکوف، کاربرد گسترده‌ای در توسعه مدل‌های پیش‌بینی عملکرد شبکه جاده داشته‌است (Murad & Abaza, 2010; Li et al., 1996; Abaza, Mandiartha, 2012; Lethanh, 2013; Kobayashi & Askari et al., 2016; Abaza, 2017). در این تحقیق با بهره‌گیری از این روش سعی شد تا درصد احتمال کیفیت قطعات جاده در سال‌های مختلف بررسی شود. براساس پژوهش (Haas et al., 2004) زنجیره مارکوف از دقیق‌ترین مدل‌های پیش‌بینی است، چراکه قادر به پیش‌بینی وضعیت عملکردی کیفیت آینده جاده مطابق با وضعیت فعلی آن است و از این قابلیت می‌توان در برنامه‌ریزی عملیات نگهداری بهره جست. همان‌طور که در جدول‌های ۶ و ۷ و شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، درصد احتمال گذار قطعات جاده از یک حالت کیفی به حالت دیگر و همچنین تعیین احتمال کیفیت قطعات جاده براساس این شاخص از درجه محافظه‌کاری بیشتری در مقایسه با شاخص PCI برخوردار است. برای مثال آن‌طور که از جدول ۴ مشهود است، روند گذار قطعات جاده از یک حالت کیفی به حالت دیگر، در شرایط استفاده از شاخص FRPCI، بسیار سریع‌تر از حالتی است که شاخص PCI مدنظر باشد. اطلاعات به‌دست‌آمده از سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن شاخص FRPCI تعداد قطعاتی که از حالت خوب به متوسط (۲۲) و از متوسط به بد (۶۷) گذار کرده‌اند در مقایسه با شاخص PCI به مراتب بیشتر است،

به‌گونه‌ای که تعداد قطعات گذار کرده از حالت کیفی خوب به متوسط (۷) و حالت متوسط به بد (۱۶) برای این شاخص بسیار متفاوت بوده است. همچنین با نگاهی به جدول (۵) می‌توان دریافت که درصد احتمال (هرچند ناچیز) قرارگیری قطعه جاده در حالت عالی براساس شاخص PCI تا سال هشتم ادامه می‌باید، درحالی که براساس شاخص FRPCI این وضعیت تا سال چهارم ادامه می‌یابد. دلیل این تفاوت‌ها به جزئیاتی از خرابی سطح جاده مربوط است که تنها در شاخص FRPCI مدنظر قرار می‌گیرد و مخصوص شبکه جاده‌های جنگلی است و همین خرابی‌های جزئی ممکن است سبب گذار قطعات از یک حالت کیفی به یک حالت نامطلوب‌تر شود. در پایان سال پنجم پیش‌بینی کیفیت جاده، احتمال قرارگیری قطعات در وضعیت کیفی عالی برای دو شاخص PCI و FRPCI به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۱ و ۰/۰ و برای وضعیت کیفی گسیخته برابر ۰/۰۱۷۸ و ۰/۰۶۹۳ به‌دست آمد. در انتهای سال دهم، احتمال قطعات در وضعیت کیفی عالی برای دو شاخص PCI و FRPCI برابر صفر و ۰/۰۵ درصد و برای وضعیت کیفی گسیخته برای دو شاخص به ترتیب ۰/۰۱۷۸ و ۰/۰۵۲۳ است که نشان می‌دهد تا پایان سال پنجم ۸۹ درصد جاده در وضعیت گسیخته و در انتهای سال دهم بیش از ۹۰ درصد آن در وضعیت گسیخته قرار خواهد گرفت، درحالی که این مقدار برای وضعیت عالی ۰/۰۵ و صفر پیش‌بینی شده است. با توجه به آنکه روسازی جاده‌ها از سرمایه‌های عظیم در مدیریت جنگل محسوب می‌شوند، مقادیر عددی کیفیت‌های پیش‌بینی‌شده روسازی جاده بیانگر آن است که استفاده از شاخص FRPCI در مقایسه با دیگر شاخص‌ها در برآورد کیفیت جاده از اولویت بیشتری برخوردار است و به‌کمک آن می‌توان از گذارهای صورت‌گرفته آگاهی یافت و برای زمان‌بندی عملیات تعمیر و نگهداری اقدام کرد. در شرایط فعلی اقتصادی کشور و مواردی همچون نوسان‌های شدید قیمت نفت

اندازه‌گیری خرابی سطح جاده در دوره‌های زمانی بیشتر، نتایج دقیق‌تری از پیش‌بینی روند زوال جاده در دوره‌های آتی به‌دست می‌دهد و راهنمایی برای مهندسان جاده خواهد بود تا ضمن پیش‌بینی دقیق‌تر زمان تعمیر و نگهداری، از گذار قطعات جاده از یک حالت کیفی به حالت دیگر اجتناب ورزند و بدین ترتیب هزینه‌های هنگفت تعمیر و بازسازی جاده را تا کمترین حد ممکن کاهش دهند. براساس نتایج این پژوهش، مدل‌های پیش‌بینی عملکرد شبکه جاده با استفاده از زنجیره مارکوف را می‌توان با تجارب متخصصان و مهندسان جاده تلفیق کرد و بینش بهتری از عناصر درگیر در شرایط واقعی فراهم آورد.

در بازارهای جهانی، افزایش تورم، هزینه‌های هنگفت جاده‌سازی و کمبود بودجه و اعتبارات در سازمان جنگل‌ها و مراتع، با توجه به سرعت بیشتر تغییر جاده از کلاس‌های عالی و خوب به متوسط نسبت به کلاس متوسط و بد به کلاس گسیخته، پیشنهاد می‌شود اولویت‌بندی برنامه تعمیر و نگهداری در کلاس‌های عالی و خوب صورت گیرد تا از این طریق سرعت روند تخریب جاده کاهش یابد و سرمایه‌های اختصاص‌یافته در بخش جاده‌سازی محفوظ بماند. در این تحقیق وضعیت خرابی ۱۸۵ قطعه از شبکه جاده با دو شاخص PCI و FRPCI در دوره زمانی دوساله اندازه‌گیری شد و روند زوال جاده در دوره ده‌ساله پیش‌بینی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که

## References

- Abaza, K., Ashur, S., & Al-Khatib, I. (2004). Integrated Pavement Management System with A Markovian Prediction Model. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 753-768.
- Abaza, K. A., & Murad, M. M. (2010). Pavement rehabilitation project ranking approach using probabilistic long-term performance indicators. *Transportation research record*, 2153(1), 3-12.
- Abaza, K.A. (2017). Empirical Approach for Estimating the Pavement Transition Probabilities Used In Non-Homogenous Markov Chains. *International Journal Of Pavement Engineering*, 18(2), 128-137.
- Askari, S., Najafi, A., & Alavi, J. (2016). Introducing the FRPCI index and evaluating the condition of forest road pavement using this index. *Proceedings of 3th conference on Agricultural Sciences and Natural Resources on the Road to Development*. Farhangian University of Golestan Province.
- Ghajar, I., Poureman, A., Naghdi, R., & Nikooy, M. (2019). Shade trees effects on some forest road pavement destruction indexes. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 27(1), 77-88.
- Haas, M., Mittnik, S., & Paoella, M.S. (2004). A New Approach to Markov-Switching Garch Models. *Journal Of Financial Econometrics*, 2(4), 493-530
- Heydari, M.J., Najafi, A., & Alavi, J. (2016). Identifying the level of warning of forest road pavement and its management using genetic algorithm. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 24(4), 577-587.
- Heydari, M., Najafi, A., & Alavi, J. (2018). Pavement Deterioration Modeling for Forest Roads Based on Logistic Regression and Artificial Neural Networks. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 39(2), 271-287.
- Kobayashi, K., Kaito, K., & Lethanh, N. (2012). A statistical deterioration forecasting method using hidden Markov model for infrastructure management. *Transportation Research Part B, Methodological*, 46(4), 544-561.
- Labi, S., & Sinha, K. (2003). The effectiveness of maintenance and its impact on capital expenditures. *Joint Transportation Research Program*, 208p.

- Nasiri, M., Hosseini, S.A., Tafazoli, M., & Sohrab, M. (2012). The Role of Logging Operation on Rut Development in Hyrcanian Forest Roads. *Journal of Applied Biological Sciences*, 6(3), 7-11.
- Li, N., Xie, W.C., & Haas, R. (1996). Reliability-based processing of Markov chains for modeling pavement network deterioration. *Transportation research record*, 1524(1), 203-213.
- Li, Li., Sun, L., & Ning, G. (2014). Deterioration Prediction of Urban Bridges On Network Level Using Markov-Chain Model, *Mathematical Problems in Engineering*.
- Mandiartha, P., Duffield, C. F., Thompson, R. G., & Wigan, M. R. (2012). A stochastic-based performance prediction model for road network pavement maintenance. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 21(3), 34.
- Meneses, S., & Ferreira, A. (2013). Pavement Maintenance Programming Considering Two Objectives: Maintenance Costs and User Costs". *International Journal of Pavement Engineering*, 14(2), 206–221.
- Talebi, M., Majnounian, B., Abdi, E., & Tehrani, F. B. (2015). Developing a GIS database for forest road management in Arasbaran forest, Iran. *Forest science and technology*, 11(1), 27-35.
- Worm, J.M., & Van Harten, A. (1996). Model Based Decision Support for Planning of Road Maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 51(3), 305-316.



*Research Article*

## **Predicting the deterioration of the forest road network by employing the Markov chain (Case study: Forest road in the western part of Haraz)**

**Sh. Ahrari<sup>1</sup>, A. Najafi<sup>2\*</sup>, and A. Hoseinzade Kashan<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ph.D. Student in Forest Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences TMU, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Associate Prof., Dept. of Forest Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, TMU, Tehran Iran.

<sup>3</sup> Associate Prof., Dept. of Industrial Engineering, Faculty of Industrial and Systems Engineering, TMU, Tehran Iran.

(Received: 19 November 2020, Accepted: 22 April 2021)

### **Abstract**

Forest road networks play an important role to achieve management goals in forest ecosystems and despite of implementation of the forest logging ban, their protection and maintenance cannot be stopped. Therefore, in order to allocate budget and prioritize the maintenance planning, designing a reliable model for predicting the condition of road pavement failure has great importance. The purpose of this study is to predict the performance of road pavement for planning its maintenance management using Markov chain theory. In the present study, 185 road sections in the forest roads of West Haraz were selected and the data of pavement, surface and roadside conditions were measured in different plots during 2015-2018. Then, the functional quality of the road was evaluated by the PCI index and the developed index for forest roads (FRPCI). The pavement quality was classified into five classes: excellent, good, average, bad and broken. After assessing the current situation, the road future situation was predicted over a period of ten years using the Markov chain. The results of this study based on the Markov chain model showed that the process of road decline from the upper class to the good is faster than the process of changing it from the middle class to the poor. Given that a large amount of capital is allocated in forest management plans to road construction and maintenance, need to speed up the protection and maintenance of the road, especially on better quality roads is vital. According to the study, the Markov chain model has sufficient capability in predicting the process of road deterioration and road network maintenance programs.

**Keywords:** Decision support system, Road break modeling, Road maintenance, Road pavement management.

