Original Article
Journal of Natural Environment 75(3): 502-514 (2022)
Print ISSN: 2008-7764/Online ISSN: 2423-7817
https://jne.ut.ac.ir/

مقاله کامل
نشریه محیط زیست طبیعی
دوره ۷۵، شماره ۳: ۵۰۲-۵۱۴ (۱۴۰۱)

پیش‌بینی زوال روسازی جادهٔ جنگلی در دورهٔ زمانی توقف بهره‌برداری چوبی در جنگل‌های کوهستانی شمال کشور

محسن عبداللهی[۱] ،سید عطا اله حسینی[۱*] ، اکبر نجفی[۲]

[۱]گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
[۲]گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶**

چکیده

عدم تخصیص بودجهٔ کافی پس از اجرای قانون استراحت جنگل‌ها، مرمت و نگهداری جاده‌های جنگلی طرح‌های جنگلداری را مختل و موجب زوال آن‌ها شده است. هدف از این مطالعه، پیش‌بینی زوال جاده جنگلی در دورهٔ ۱۰ سالهٔ اجرای قانون استراحت جنگل با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف پنهان و ارزیابی تأثیر آن بر هزینهٔ مرمت و نگهداری جاده می‌باشد. در این پژوهش، طول ۱۱/۶ کیلومتر از شبکهٔ جادهٔ جنگلی سری ۳ آغوزچال نوشهر انتخاب شد. همچنین با توجه به اطلاعات، وضعیت جاده و با استفاده از شاخص‌های روسازی PCI و FRPCI در دورهٔ زمانی متوالی ۳ ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۶) بررسی و روند زوال جاده با استفاده از مدل زنجیره مارکوف پنهان در دورهٔ ۱۰ ساله پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد، سرعت تغییر وضعیت روند زوال جاده از شرایط عالی به خوب سریعتر از تغییر از مرحله متوسط به ضعیف می باشد. از بین قطعات مورد بررسی، حدود ۶۰٪ درصد تعداد قطعات جاده به‌صورت گسیخته و کمترین تعداد، قطعات با وضعیت عالی می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود با توجه به اجرای طرح تنفس و عدم تخصیص بودجه در طی یک دورهٔ ۱۰ ساله، جاده با یک شیب تند نزولی به زوال کامل برسد. نتایج این تحقیق، ضرورت تسریع در تخصیص بودجه جهت مرمت و نگهداری جاده موجود را تأکید می‌کند. همچنین مدل پیش‌بینی عملکرد زنجیرهٔ مارکوف با خطای مربع میانگین‌ها ۰/۰۱، قابلیت‌های لازم جهت پیش‌بینی دقیق روند واقعی زوال جاده را دارا می‌باشد. بکارگیری دیگر مدل‌های پیش‌بینی و ارزیابی در دوره‌های زمانی بیشتر، نتایج دقیق‌تری به‌همراه خواهد داشت.

کلید واژگان: مدل‌سازی، زنجیرهٔ مارکوف، استراحت جنگل هیرکانی، تعمیر و نگهداری جاده جنگلی

*نویسنده مسئول at.hosseini@ut.ac.ir

مقدمه

جاده‌های جنگلی به‌عنوان شریان حیاتی مدیریت و برنامه‌ریزی جنگل هیرکانی، با هدف سهولت دسترسی به عرصه با اهداف متفاوت احداث می‌شوند. این زیرساخت‌ها در گذشته، تنها از نظر قابلیت خروج چوب درنظر گرفته می‌شدند، اما امروزه کارکرد چندمنظوره دارند (Abdi *et al*., 2012). جادهٔ جنگلی در محیط طبیعی و تحت تأثیر شرایط اقلیمی، باران شدید و برف سنگین با احتمال تخریب بسیار بالا قرار دارد. به‌منظور عملکرد درست و پایدار شبکه جاده‌های جنگلی و حفظ سرمایهٔ اولیه ساخت این شبکه، لازم است مدیریت جنگل به امر نظارت و نگهداری منظم جاده‌های جنگلی توجه ویژه داشته باشد (Hosseini *et al*., 2010). عواملی که سبب کاهش عملکرد این سیستم می‌شوند (ترافیک، شرایط محیط‌زیستی)، را باید شناسایی نمود. بدون عملیات تعمیر و نگهداری، قابلیت جاده‌ها در ارائه خدمات با گذشت زمان کاهش می‌یابد و این امر افزایش هزینه‌های مربوط به ماشین‌ها و پیرو آن، مخاطرات طبیعی ناشی از جاده را به‌دنبال خواهد داشت (Tabatabaei and Khoorani, 2012). روسازی جاده‌های جنگلی سرمایهٔ با ارزشی در مدیریت جنگل است و هرساله هزینهٔ زیادی صرف تعمیر و نگهداری آن‌ها می‌شود (Visser *et al*., 2009). تحقق هدف‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، شامل ارزیابی کارا و مؤثر وضعیت موجود شبکهٔ روسازی جاده، پیش‌بینی عملکرد و عمر مفید روسازی، هماهنگی کلیه فعالیت‌های طرح، ساخت و نگهداری روسازی جاده و تخصیص بهینهٔ بودجه در فعالیت‌های تعمیر و نگهداری، صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری و امکان انتخاب بهترین زمان و روش تعمیر و نگهداری با اجرای صحیح سامانه مدیریت جاده‌های جنگلی در کشور امکان‌پذیر خواهد بود (Goodarzi and Najafi, 2017). عوامل اقلیمی و فرآیندهای آبشویی و یا بروز یخزدگی روی سطح جاده می‌توانند بسیار تأثیرگذار باشند و روند زوال جاده را تشدید نمایند. مطالعات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که متغیرهای مختلف کمی و کیفی بر زوال جاده مؤثرند و باید در عملیات تعمیر و نگهداری مدنظر قرار گیرند (Martin *et al*., 2013). این متغیرها یا طبیعی (مانند ریزشی یا لغزشی بودن دامنه، دوری یا نزدیکی به رودخانه یا دره، شرایط فیزیوگرافی، بارش، جهت دامنه، نوع خاک و تراکم تاج‌پوشش در حاشیه و سطح جاده) یا به خود جاده (مانند ضخامت و نوع مصالح روسازی استاندارد جاده و نوع مصالح) یا به شرایط استفاده از جاده (میزان بار وارده به جاده و شرایط ترافیک) ارتباط دارند (Heidari *et al*., 2017). یک سیستم مدیریت روسازی و جاده‌سازی خوب، نیاز به یک مدل پیش‌بینی و عملکرد دقیق و مؤثر سطح جاده دارد. سرویس روسازی با درک فرآیند و نحوه کاهش می‌تواند تمهیدات و منابع لازم را برای جلوگیری از روند تسریع زوال و فرسودگی پیش‌بینی کند (Kazemi and Khabiri, 2016).

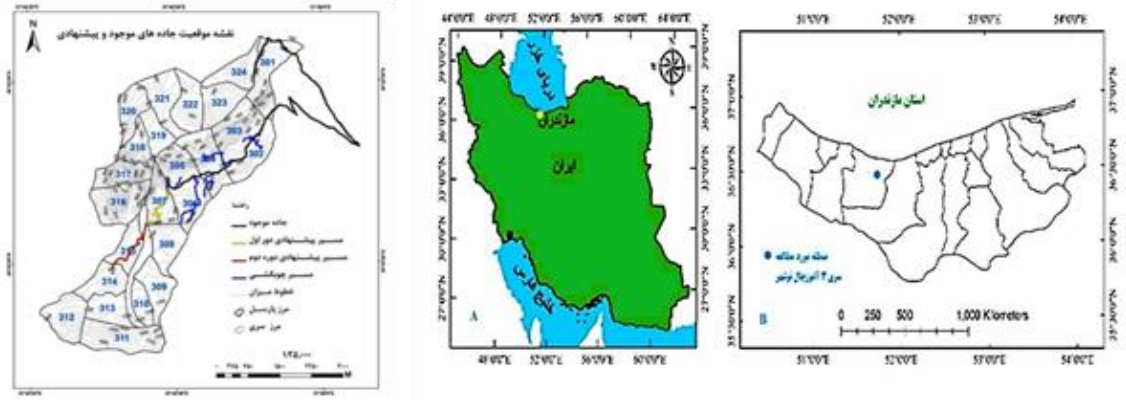
مطابق بند "ف" ماده ۳۸ قانون برنامه ششم، توقف فعالیت طرح‌های جنگلداری شمال کشور که در سال ۱۳۹۵ به تصویب مجلس شورای اسلامی رسید و مفهوم تحول مدیریت در آن به الزامی قانونی در برنامهٔ ششم توسعهٔ اجتماعی–اقتصادی کشور تبدیل شد. بر این اساس، هرگونه بهره‌برداری چوبی از جنگل‌ها به مدت ۱۰ سال ممنوع و متوقف شد (FRWO, 2017). با توجه به اجرایی شدن این قانون، در پژوهش حاضر با یک رویکرد ارزیابی، سناریوی روند زوال جاده‌های جنگلی بررسی می‌شود. با توجه به عدم تخصیص بودجه و تخریب جاده‌های جنگلی، اولویت‌بندی برنامه‌ریزی نگهداری، شناسایی و طراحی یک مدل مکانی و زمانی قابل اعتماد برای پیش‌بینی وضعیت خرابی روسازی و تعمیر بهینهٔ جاده لازم و ضروری است. هدف از انجام این تحقیق این است که مشخص شود درصورتی‌که وضعیت و روند استراحت جنگل با شرایط فعلی و به همین شکل در سال‌های آتی استمرار داشته باشد، چه مقدار جاده‌های جنگلی آسیب می بینند؟ مدل زنجیره مارکوف از جمله روش‌های پیش‌بینی احتمالاتی است که با روش‌های سادهٔ

ریاضی، حل احتمالات مربوط به فرآیندهای وابسته را آسان نموده است. این مدل دارای قابلیت دسترسی پیش‌بینی‌ها بلافاصله بعد از انجام مشاهدات، دوم نیاز به حداقل محاسبات پس از پردازش داده‌ها است (Guan *et al*., 2008). عناصر اصلی مدل‌های مارکوف در روسازی جاده‌های جنگلی، تعداد حالات وضعیت جاده، احتمالات حالت‌های نشان‌دهندهٔ مشخصات جاده در شرایط مختلف، احتمالات گذار معرف سرعت زوال جاده، طول گذار معرف فاصله زمانی بین دو گذار متوالی که معمولاً در یک یا دو سال انتخاب می‌شوند و تعداد گذار مربوط به دورهٔ تجزیه و تحلیل می‌باشد (Elhadidy *et al*., 2015). تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص زوال روسازی جاده‌های جنگلی صورت گرفته است. در مطالعات انجام شده تأثیر بیرون‌زدگی جاده به‌عنوان عامل مهم در زوال روسازی جاده‌های جنگلی به اثبات رسیده است. با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی می‌توان با احتمال خوب و ۸۰ درصدی به پیش‌بینی وضعیت روسازی پرداخت (Goodarzi and Najafi., 2017). مطالعات گذشته نشان داده است از بین اشکالات روسازی؛ شیب عرضی بیشترین درصد تطابق با استاندارد را دارد، همچنین شیار چاله، به‌ترتیب بیشترین و کمترین فراوانی را دارد. ترانشه‌های خاک‌برداری نسبت به ترانشه‌های خاک‌ریزی بیشترین میزان اشکال را دارند (Talebi *et al*., 2015).

در سال‌های گذشته از الگوریتم‌های فرابتکاری هم در اولویت‌بندی زوال روسازی جاده‌های جنگلی استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک ابزار مناسبی است که می‌تواند با استفاده از عامل مانندهای تابع زوال و هزینه، به‌بررسی سطح هشدار روسازی جاده‌های جنگلی بپردازد (Heidari *et al*., 2015). این الگوریتم با شناخت عامل‌های مؤثر بر نگهداری ارزانتر و سریع‌تر جاده‌های جنگلی کمک می‌نماید (Elhadidy *et al*., 2015). روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (فرآیند تحلیل سلسله مراتبی) در مدیریت تعمیر و نگهداری روسازی جاده‌های جنگلی مورد استفاده قرار گرفته است (Goodarzi and Najafi, 2017). در ارزیابی وضعیت روسازی جاده جنگلی با استفاده از شاخص وضعیت روسازی جاده‌های جنگلی (FRPCI[1]) نیز می‌توان به الویت‌بندی پرداخت و در عملیات مربوط به نگهداری، هزینه‌ها را به‌صورت بهینه صرف نمود (Asgari *et al*., 2016). ارزیابی تخریب روسازی جاده‌های جنگلی در محل قوس‌ها از تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمون‌های آماری t جفتی و ویلکاکسون استفاده شده است (Ghavidel *et al*., 2021). همچنین اثرات سایه‌اندازی درختان بر برخی شاخص‌های تخریب روسازی جاده جنگلی توسط Ghajar و همکاران (۲۰۱۹) بررسی شده است. نتایج نشان داد که شاخص‌های مورد بررسی، تفاوت معنی‌داری بین مناطق سایه و غیر سایه داشتند (Ghajar *et al*., 2019).

در مطالعات دیگر مدل‌سازی زوال روسازی جاده‌های جنگلی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون لجستیک تاریخ تعمیر و نگهداری، ضخامت روسازی، بارش، درصد تاج پوشش و شیب متغیرهای پیشگوی مهم در زوال روسازی جاده‌های جنگلی معرفی شده‌اند (Heidari *et al*., 2018). مدل‌های دقیق پیش‌بینی عملکرد روسازی برای اطمینان از تخصیص بهینه منابع در مدیریت تعمیر و نگهداری ضرورت دارند (Pedro Marcelino *et al*., 2020). مدل زنجیرهٔ مارکوف قابلیت کافی در پیش‌بینی فرآیند زوال جاده را داشته و با تعیین زمان تقریبی گذار، قطعات جاده از یک حالت کیفی به حالت دیگر می‌تواند در کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی جاده مؤثر واقع شود (Ahrari *et al*., 2022). استفاده از مدل‌های زوال روسازی در مطالعات گذشته تحت شرایطی است که اطلاعاتی از جاده موجود است و با شرایط عدم اطمینان درخصوص برنامه‌ریزی مواجه نبوده‌اند (Ahrari *et al*., 2022). این پژوهش در نوع خود برای اولین باز در جنگل‌های شمال کشور به اجرا درآمد برای این منظور، از زنجیرهٔ مارکوف پنهان جهت مدل‌سازی

[1]Forest Road Pavement Condition Index



شکل ۱- منطقهٔ مورد مطالعه و جاده‌های موجود و مورد بررسی.

و پیش‌بینی روند چگونگی زوال جادهٔ جنگلی و اولویت‌ها و برنامه‌ریزی جهت مدیریت تعمیر و نگهداری از آن استفاده می‌شود. هدف اصلی از انجام این مطالعه، پایین آوردن هزینه‌های سنگین مرمت و نگهداری و بازسازی دوبارهٔ جاده‌های جنگلی است که با صرف هزینه‌های بسیار زیاد، احداث شده‌اند و جزء سرمایه‌های ملی کشور محسوب می‌شوند که نگهداری بهینهٔ از این جاده‌ها جزء وظایف ملی محسوب می‌شود.

مواد و روش ها

موقعیت منطقه: منطقهٔ مورد مطالعه در محدودهٔ طرح جنگلداری آغوزچال از سال ۱۳۸۲ تاکنون تحت مدیریت دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس نور می‌باشد. ناحیه طرح، در دامنهٔ ارتفاعی ۱۷۵۰-۱۵۰ متر از سطح دریا و عرض جغرافیایی؛ "۵۶، '۳۲، °۳۶ - "۲۳، '۲۹، °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی؛ "۳۹، '۴۷، °۵۱- "۲۰، '۴۳، °۵۱ شرقی، با میانگین بارندگی سالیانه ۱۳۰۸/۸میلی‌متر قرار گرفته است (FRWO, 2002). دلیل انتخاب این منطقه، به علّت پایش های متفاوت برای انجام طرح‌های پژوهشی و پایان نامه‌های مختلف در سال‌های گذشته و وجود اطلاعات مناسب برای انجام این تحقیق می‌باشد. مصالح موجود در این جاده، شن دانه‌بندی شده، سنگ شکسته، ماسه و مخلوط کوهی دانه درشت، مصالح رودخانه‌ای دانه متوسط و ریز مناسب روسازی می‌باشد و تعمیر و نگهداری اساسی جاده و کانال کناری توسط مجری طرح (دانشگاه تربیت مدرس) صورت گرفته است (FRWO, 2013). وضعیت زوال روسازی جاده، سابقاً مورد آماربرداری قرار گرفته بود (Asgari *et al*., 2016) و بعد از گذشت سه سال، مجدداً در سال ۱۳۹۹ در همان نقاط برداشت قبلی، دقیقاً آماربرداری تکرار شد.

در انجام پژوهش حاضر در سطح ۱۱/۶ کیلومتر شبکه جاده‌های جنگلی سری ۳ آغوزچال شهرستان نوشهر، تعداد ۲۰ قطعه به‌صورت متغیر با توجه به توپوگرافی، پیچ، محل دپو، تقاطع، وجود زهکش‌های عرضی، تغییر ناگهانی جهت و شیب، کانال کناری، پل و وجود معدن و دیگر عوامل انتخاب شده‌اند که بر اساس بازیابی اطلاعات نقاط توسط GPS و رنگ‌آمیزی صورت گرفته روی درختان در مطالعهٔ گذشته بوده است. از آنجایی‌که برای برآورد مقادیر زوال نیاز به مقایسه با داده‌های گذشته می‌باشد، خرابی‌های جاده در تمامی سطح جاده بررسی شد (Heidari *et al*., 2018). روش آماربرداری به‌صورت منظم تصادفی و ترانسکت‌های ۱۰ متری بود. برای ارزیابی شرایط جاده، سیستم‌های طبقه‌بندی متعددی توسعه یافته‌اند (Heidari *et al*., 2018; Ahrari *et al*., 2022). در این پژوهش کیفیت عملکردی جاده، عموماً با طبقه‌بندی شاخص شرایط روسازی PCI (Pavement condition Index)؛ که شاخص توسعه داده شده برای جاده‌های جنگلی و شاخص وضعیت روسازی جاده‌های جنگلی FRPCI (Forest Road Pavemant

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص PCI با استفاده از روش FHWA (Ammar *et al.*, 2015).

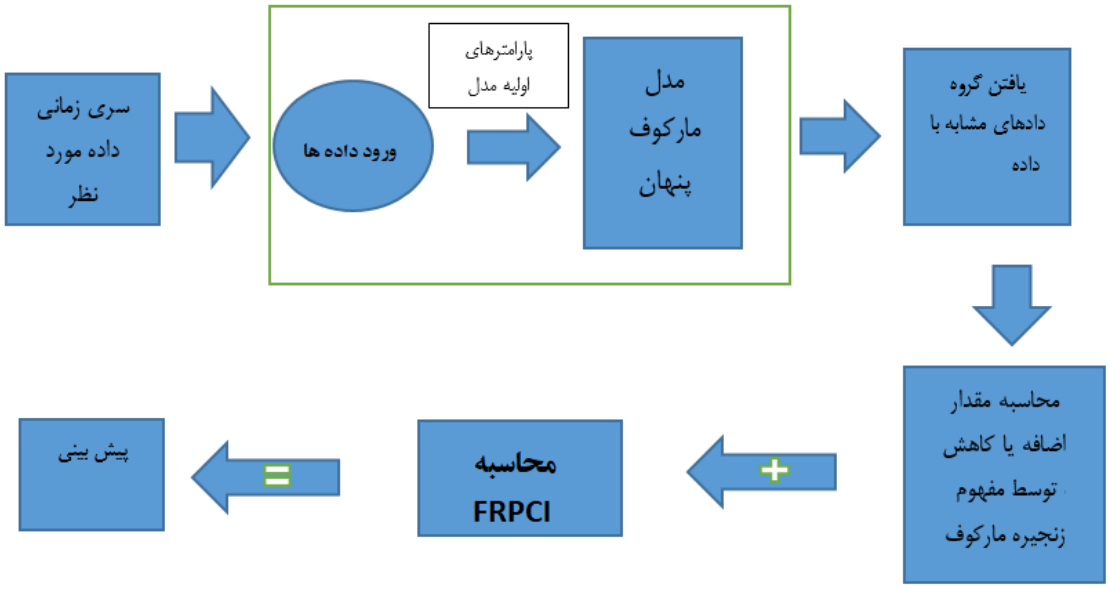
طبقه‌بندی	PCI	شرح وضعیت جاده
۱	۰-۲۰	وضعیت تخریب شده (گسیخته)، جاده قابلیت عبور و مرور ندارد، نیازمند عملیات اصلاحی.
۲	۲۰-۴۰	وضعیت بد، زوال، فقدان قطعات پیشرفته، نیازمند نگهداری اساسی.
۳	۴۰-۵۵	وضعیت نامناسب، فقدان اندک کیفیت قطعات، ترک خوردگی، نیازمند بازسازی کم.
۴	۵۵-۷۰	وضعیت خوب، خرابی‌های کم، نیازمند نگهداری کم.
۵	۷۰-۱۰۰	وضعیت عالی، شرایط جدید، نبود خرابی قابل توجه.

جدول ۲- مقدار FRPCI درجه‌بندی شرایط مربوط به آن در جاده‌های جنگلی (Heidari *et al.*, 2015).

درجه‌بندی	گسیخته	بد	متوسط	خوب	عالی
PCI	۰ -۱۰	۱۰/۱-۴۰	۴۰/۱-۶۵	۶۵/۱-۸۵	۸۵/۱-۱۰۰
فاکتورهای مورد ارزیابی و وزن دهی					
نوع خرابی		شدت خرابی			
	گسیخته (۱-۰)	بد (۴-۱/۱)	متوسط (۶/۵-۴/۱)	خوب (۸/۵-۶/۶)	عالی (۱۰-۸/۶)
چاله (cm)	>۱۲	۱۲-۸	۸-۵	۵-۳	۳-۰
شیار (cm)	>۱۵	۱۵-۱۰	۱۰-۸	۸-۵	۵-۰
بیرون‌زدگی (cm)	>۱۰	۱۰-۷	۷-۵	۵-۳	۳-۰
وضعیت کانال	کاملاً پر	خارج از شکل	پر	نیمه‌پر	خالی
وضعیت زهکش	ندارد	ایراد فنی	ایراد کلی	ایراد جزیی	بدون ایراد
شانه (m)	ندارد	۰/۱	۰/۲	۰/۳	>۰/۳
وضعیت ترانشه	ریزشی	ریزش به دره	ریزش به جاده	ریزش به کانال	بدون ریزش
شن روی جاده	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	ندارد
موج‌دار شدن	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	ندارد
یخ‌زدگی جاده	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	ندارد
مجموع وزن‌ها	۰-۱۰	۱۰/۱-۴۰	۴۰/۱-۶۵	۶۵/۱-۸۵	۸۵/۱-۱۰۰

condition Index) اندازه‌گیری شد. این شاخص به‌دلیل سهولت در امر محاسبه و در عین حال کاربردی و فراگیر بودن آن مورد توجه می‌باشد که از یک مقیاس ۰ تا ۱۰۰ برای ارزیابی عناصر جاده استفاده می‌کند (جدول‌های ۱ و ۲) (Heidari *et al.*, 2016). در این طبقه‌بندی، جاده‌ها تا زمانی که میزان عددی طبقه‌بندی به ۱ برسد، قابلیت سرویس‌دهی دارند. پس از تعیین شبکهٔ زوال جاده‌های مورد مطالعه، برنامهٔ تعمیر و نگهداری برای آن تعریف شد. همچنین طول دورهٔ طرح برنامهٔ ترمیم و نگهداری و واحدهای زمانی سه ساله و ده ساله مشخص شد (برنامهٔ تعمیر و نگهداری سری در طول دورهٔ طرح به تفکیک این واحد زمانی تعیین می‌شود) برای ساختن مدل، مجموعه داده‌های بیان‌کنندهٔ کیفیت جاده با شاخص PCI و FRPCI در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۹ استفاده شدند (Ahrari *et al.*, 2022). در این پژوهش از نرم‌افزار R نسخهٔ ۴. ۳. ۲ به‌منظور شبیه‌سازی شرایط حاکم بر جاده و مدل‌سازی زوال با توجه به عدم اطمینان درخصوص بودجه با استفاده از روش زنجیرهٔ مارکوف استفاده شده است. مدل استفاده شده از کتابخانه depmixS4 در نرم‌افزار Rstudio می‌باشد R (Core Team, 2021).

مدل‌سازی زوال: در این مطالعه، باتوجه به بودجه انقباضی طرح تنفس و جهت غلبه بر این مشکل، از راه‌حل بالقوه



شکل ۲- فلوچارت پیشنهادی در استفاده از روش HMM در بررسی زوال جاده‌های جنگلی.

تخمین احتمالات انتقال از مدل پنهان مارکوف استفاده شده است. مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف[2] یا HMM یک مدل احتمالی است که دارای تعداد محدودی از حالت‌های پنهان و مجموعه‌ای از مشاهدات گسسته یا پیوسته است. هر حالت با یک مجموعه احتمال انتقال بر اساس زنجیرهٔ مرتبهٔ اول مارکوف و با توزیع احتمالی انتشار مشاهدات مشخص می‌شود (Pedro Marcelino *et al*., 2020).

در مدل عادی مارکوف، حالت به‌طور مستقیم توسط ناظر قابل مشاهده است و احتمال‌های انتقال بین حالت‌ها تنها پارامترهای موجود هستند. در یک مدل پنهان مارکوف، حالت به‌طور مستقیم قابل مشاهده نیست، اما خروجی، بسته به حالت، قابل مشاهده است. هر حالت یک توزیع احتمال روی خروجی ممکن دارد بنابراین دنبالهٔ تولید شده توسط یک مدل پنهان مارکوف اطلاعاتی درباره دنبالهٔ حالت‌ها می‌دهد. صفت 'پنهان' به دنبالهٔ حالت‌هایی که مدل از آن‌ها عبور می‌کند، اشاره دارد، نه به پارامترهای مدل؛ حتی اگر پارامترهای مدل به‌طور دقیق مشخص باشند، مدل همچنان 'پنهان' است و در مواردی که متغیری پنهان و انقباضی است، کاربرد فراوانی دارد. مدل‌های پنهان مارکوف بیشتر به‌دلیل کاربرد در بازشناخت الگو، مانند تشخیص صدا و دست‌خط، تشخیص اشاره و حرکت، برچسب‌گذاری اجزای سخن، بیوانفورماتیک و فرآیندهای دوره‌ای تعمیر و نگهداری شناخته‌شده هستند (Pedro Marcelino *et al*., 2020).

این موضوع در طرح تنفس جنگل کارایی بهتری از خود نشان خواهد داد. برای استفاده از HMM برای مدل‌سازی زوال جاده لازم است فرض شود که بودجهٔ طرح تنفس یک فرآیند پنهان است یعنی نمی‌توان آن را مستقیماً مشاهده کرد بلکه می‌تواند از طریق تکامل یک فرآیند قابل مشاهده مانند افزایش خرابی، استنتاج شود. سپس احتمالات انتقال برای مدل مارکوف با استفاده از رابطهٔ ریاضی بین فرآیندهای پنهان و قابل مشاهده، تخمین زده می‌شود. به‌طور کلی فرایند استفاده از روش HMM در شکل ۲ نشان داده شده است. عمر باقیمانده ES[3] پیش‌بینی شده با استفاده از روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر مشاهدات، تخمین زده شد.

بر اساس شکل ۲ مدل ارائه شده به نوعی از سه قسمت اصلی تشکیل شده است: ۱- یافتن گروه‌های داده مشابه با دادهٔ فعلی با مدل «مارکوف پنهان»؛ ۲- تنظیم پارامترهای

[2]Hide Markove Model (HMM)

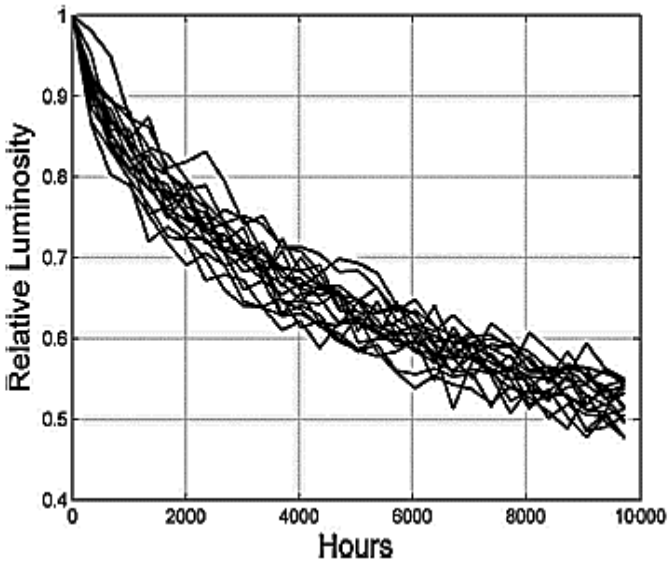
[3]Estimate Survival

اولیهٔ مدل «مارکوف پنهان»؛ ۳- محاسبهٔ مقدار اضافه یا کاهش شاخص FRPCI در سال‌های بعد نسبت به وضعیت فعلی توسط مفهوم «زنجیره مارکوف».

کل مجموعه داده‌ها به مجموعه داده‌های آموزشی و آزمون تقسیم شد. پارامترهای ناشناخته مدل‌های زنجیره پنهان مارکوف و خودهمبستگی بین داده‌ها براساس مجموعه داده های آموزشی تخمین زده می‌شود. داده‌های آزمون برای پیش‌بینی مقدار عمر باقیمانده هر قطعه جاده استفاده شده و سپس دقت پیش‌بینی مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف بررسی گردید. برای مجموعه داده‌های آموزشی، اندازه گیری‌ها از زمان شروع تا زوال روسازی جاده انجام شد و هنگامی که خرابی‌ها رخ می‌دهد، مسیرها کوتاه می‌شوند. علاوه بر این، برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی‌های پیشنهادی زمان واقعی برای مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده عمر باقیمانده ارائه شد. مجموعه داده‌ای که در اینجا استفاده شد شامل ۲۰ قطعه زوال روسازی جاده‌های جنگلی است. برای نشان دادن کاربرد روش‌های پیشنهادی، مقدار زوال ناشی از بهره‌برداری برای راحتی در همه بخش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق، روش متقابل اعتبارسنجی برای بهینه‌سازی آن انتخاب و رویکردی مبتنی بر مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف برای نمایش روند زوال پیشنهاد و ویژگی همبستگی خودکار با ماتریس ضریب مشخص شد که بیـانگر احتمـال مشاهده هر کدام از خروجی‌ها به ازای هر کدام از حالات زوال روسازی است. الگوریتم جدید براساس روش حداکثر انتظار برای توسعهٔ پارامترهای ناشناخته که از آن به‌عنوان طرح تنفس نام برده شده، در زنجیرهٔ پنهان گنجانده شد و با توجه به روش Wang و همکاران (۲۰۲۱) توسعه یافت. با توجه به اینکه زوال روسازی تابع زمان است، در طول زمان با از دست رفتن داده و کمبود اطلاعات مواجه است و تغییر در مدل پیشنهادی ایجاد شد. سپس دو روش پیش‌بینی عمر باقیمانده بر اساس مدل زنجیرهٔ پنهان ارائه شد. بهبود روش‌های پیشنهادی در مقایسه با مطالعهٔ Asgari و همکاران (۲۰۱۶)، با مجموعه داده‌های زوال جاده‌های جنگلی نشان داده شد. علاوه بر این، داده‌ها برای نشان دادن مزایای مدل زنجیره پنهان مارکوف در مقایسه با HMM استاندارد (Ahrari *et al*., 2022) مورد استفاده قرار گرفتند. این موضوع برای نشان دادن کاربرد عمر باقیمانده در چارچوب تعمیر و نگهداری، سیاست نگهداری مبتنی بر عمر باقیمانده با مشاهدات در دوران موقت اجرای قانون استراحت جنگل هماهنگ است. با استفاده از داده‌های خرابی جاده‌های جنگلی، شکاف، رشد، سیاست پیشنهادی نیز با یک سیاست مبتنی بر شرایط متعارف مقایسه گردید. جایگزینی پیشگیرانه با هزینهٔ Cp و جایگزینی اصلاح شده با هزینهٔ Cr به‌عنوان دو روش نگهداری ممکن در این تحقیق در نظر گرفته شده است. هزینهٔ هر بازرسی Cs است و این هزینه‌ها Cs <Cp <Cr را برآورده می‌کند. علاوه‌بر این، فرض می‌شود که پارامترهای مدل شناخته شده‌اند و سیستم به‌همان اندازه پس از جایگزینی جدید مفید است. با توجه به نظریهٔ تجدید، هزینهٔ چرخهٔ مورد انتظار در واحد زمان مورد استفاده، به‌عنوان معیار ارزیابی سیاست‌های نگهداری می‌تواند به‌دست آید که CE و TE به‌ترتیب هزینهٔ نگهداری مورد انتظار و زمان چرخه را نشان می‌دهند. هزینه‌های نگهداری مورد انتظار شامل؛ هزینه جایگزینی و بازرسی در طول زمان چرخه است. همچنین، یک عدد صحیح δ به‌عنوان تعداد کل بازرسی‌ها برای سیستم تعریف می‌شود و به این ترتیب زمان چرخه $TE = \delta h$ خواهد شد. به‌منظور آنالیز حساسیت در مدل پیشنهادی، خطای جذر میانگین مربعات[۴] (RMSE) بین مشاهدات تخمینی مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف و مشاهدات واقعی به‌عنوان معیار ارزیابی استفاده شد. به‌طور معمول، هرچه RMSE کوچکتر باشد، برآورد حاصل بهتر است.

[4]Root Mean Square Error



شکل ۳- مسیرهای زوال از لحاظ زوال روسازی با گذشت زمان (ساعت).

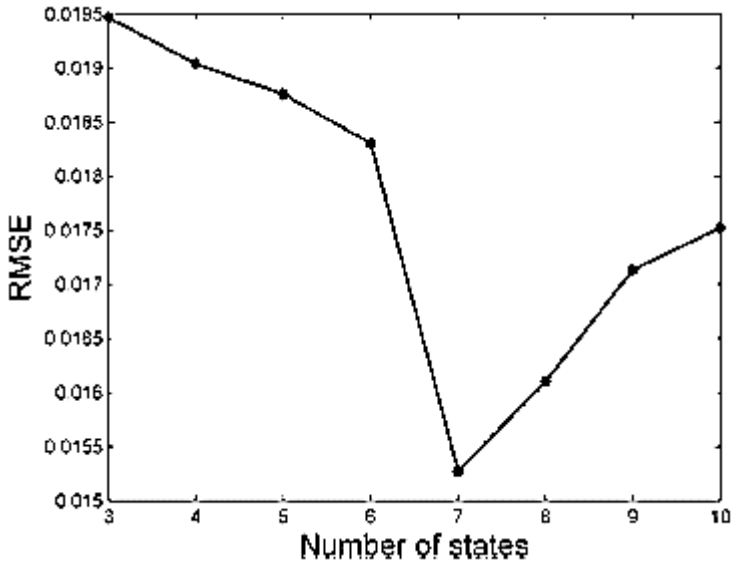
نتایج

نمونه‌هایی از عمر باقیمانده پیش‌بینی شده را برای دو تاریخچه داده با استفاده از روش پیش‌بینی پیشنهادی ارائه شده است (شکل ۳).

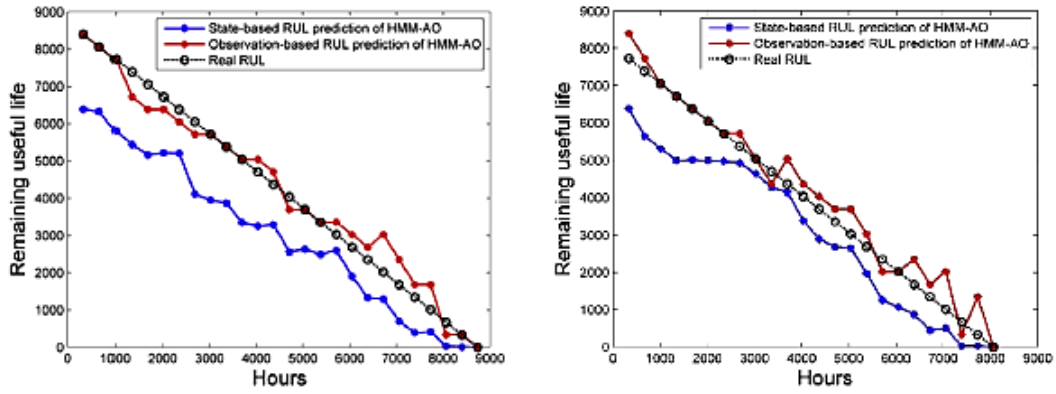
نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر حالت، کم‌تر از روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر مشاهدات است. زیرا در پیش‌بینی مشاهدات و عدم اطمینان رویداد، ارتباط خودکار که مسیر زوال از آستانه بحرانی عبور می‌کند، پایین‌تر است. محاسبهٔ تعداد باقیمانده از مراحل زمانی برای رسیدن به حالت نهایی فقط انتقال وضعیت را انجام می‌دهد، اما بدون همبستگی خودکار بین مشاهدات به حساب نمی‌آید و همچنین نشان می‌دهد هرچه مشاهدات زوال بیشتر دردسترس باشد، مقادیر پیش‌بینی شده عمر باقیمانده به‌دست آمده از روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر طرح تنفس جنگل دقیق‌تر می‌شوند(شکل ۳). با این‌حال، پدیدهٔ دیگری در شکل ۳ باید مورد توجه قرار گیرد؛ عمر باقیماندهٔ پیش‌بینی شده از روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر مشاهدات، ظاهر زاویه‌دار را نشان می‌دهد و گاهی عمر باقیمانده‌های واقعی را به میزان قابل توجهی تعریف می‌کند. علاوه بر این، هرچه شکست نزدیکتر باشد، نوسان‌پذیری عمر باقیماندهٔ پیش‌بینی شده بالاتر است.

آنالیز حساسیت در برآورد پارامتر: به‌دلیل داده‌های آموزشی کافی، پارامترهای تخمین λ، C، Σ، (π از پارامترهای واقعی $\boldsymbol{A}$) = λ، C، Σ، ($\boldsymbol{A}$ π) رد می‌شوند. بدون از دست دادن عمومیت، فرض می‌شود که $\rho1$، $\rho2$ و $\rho3$ پیش‌برآوردهایی برای ii، C و $\pi1$ را نشان می‌دهند (به‌دلیل این‌که مقادیر Σ و پارامترهای دیگر کوچک است، پیش‌برآورد آن‌ها درنظر گرفته نمی‌شود) و نتایج می‌تواند برای پیش‌بینی قوی باشند، به‌شرطی که این مقادیر خیلی بزرگ نباشد. در شکل ۳ نتایج حاصل از اجرای مدل HMM براساس داده‌های موجود و مقایسهٔ آن با گذشته در ۲۰ قطعه بازسازی شده نشان می‌دهد که شاخص FRPCI نرمال شده بر اساس روش میانگین سیر نزولی دارد و از کیفیت جاده کاسته شده است. در شکل ۴ مقادیر خطای مدل برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است و مقادیر آن باتوجه به مقادیر گزارش شده در مطالعهٔ Ahrari و همکاران (۲۰۲۲) از دقت مناسبی برخوردار است.

شکل ۴ نمودار پیش‌بینی RMSE در مقابل تعداد حالت‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، RMSE به تعداد حالت‌ها غیرحساس است و در این بهینه‌سازی پس از تعیین تعداد حالت‌ها، کمترین مقدار را در $N = 7$ (تعداد حالت‌های



شکل ٤- خطای میانگین مربع بین مشاهدات پیش‌بینی شده و واقعی در مقایسه با تعداد حالت‌ها.

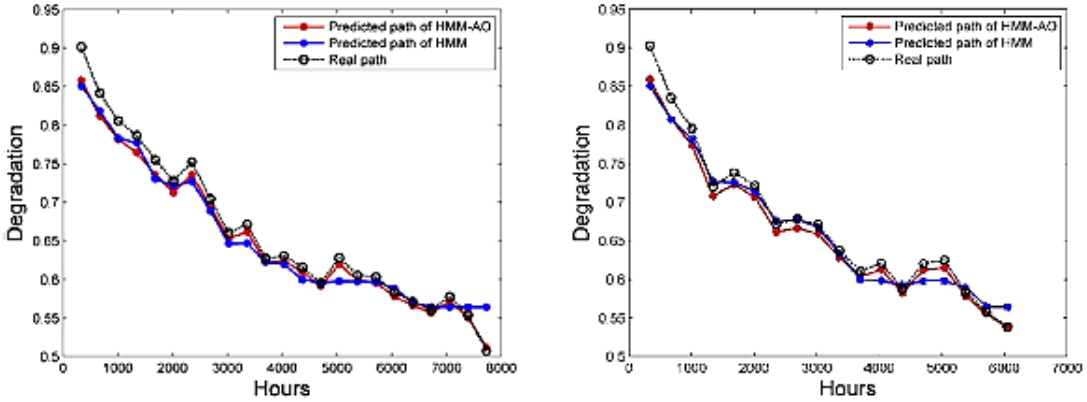


شکل ٥- زمان واقعی باقی‌مانده برای مشاهده شکست و مقادیر پیش‌بینی شده از عمر مفید باقیمانده برای دو تاریخچه داده‌ها با استفاده از دو روش پیش‌بینی پیشنهادی (سمت راست= آماربرداری ۱۳۹۹ و سمت چپ: آماربرداری ۱۳۹٦).

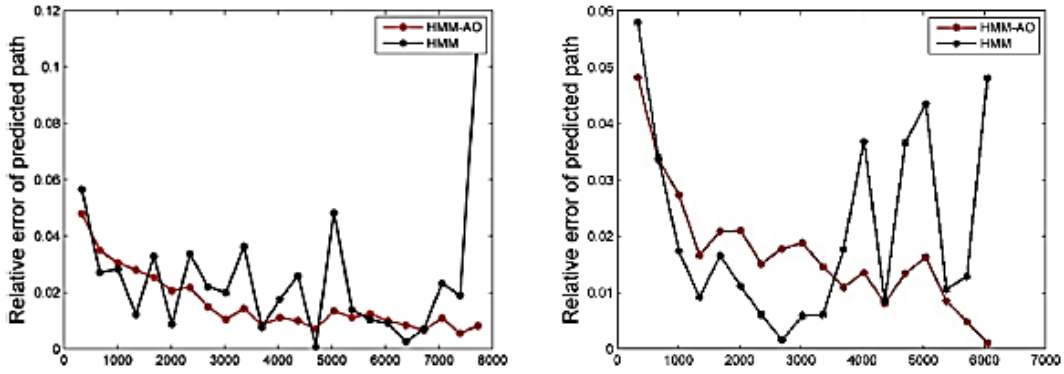
پنهان مدل) به دست می‌آورد.

مقایسه مدل زنجیره پنهان مارکوف و HMM استاندارد: در مطالعات Wangو همکاران، (۲۰۲۱)، HMM استاندارد بدون درنظر گرفتن وابستگی خودکار مشاهدات، معمولاً برای مدل‌سازی فرآیندهای زوال استفاده شد و در مطالعهٔ حاضر داده‌های HMM استاندارد شده درخصوص داده‌های گذشته نیز صدق می‌کند. با این‌حال، درجهٔ زوال قبلی می‌تواند روند زوال فعلی را تحت تأثیر قرار دهد که ارتباط بین مشاهدات ایجاد می‌شود.

پارامترهای تخمینی هر دو مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف و HMM ارائه شده است. از طریق کنتراست برآوردهای ماتریس انتقال، می‌توان مشاهده نمود که احتمال انتقال از حالت‌های کنونی به حالت‌های بعدی مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف بالاتر از HMM است. واریانس مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف برای مشاهدات بسیار کوچکتر از HMM است. علاوه بر این، احتمال حالت اولیهٔ مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف بیشتر پراکنده است. این نشان می‌دهد که مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف با توجه به همبستگی خودکار می‌تواند حالت‌ها و مشاهدات را دقیق‌تر تشخیص دهد و در نتیجه یک اثر مدل‌سازی بهتر را فراهم نماید. شکل۵ دو نمونه از مسیرهای زوال پیش‌بینی شده توسط مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف و HMM را که با مسیرهای زوال واقعی مقایسه می‌شوند، را



شکل ٦- مسیرهای زوال واقعی و مسیرهای زوال پیش‌بینی شده توسط HMM AO و HMM برای دو تاریخچه داده محاسبه شده است (سمت راست= آماربرداری ۱۳۹۹ و سمت چپ: آماربرداری ۱۳۹٦).



شکل ۷- خطای نسبی مشاهدات پیش‌بینی شده مربوط به دو تاریخچه داده (سمت راست= آماربرداری ۱۳۹۹ و سمت چپ: آماربرداری ۱۳۹٦).

ارائه می‌دهد. این نمونه‌ها نشان می‌دهند که مسیر پیش‌بینی شده مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف با مسیر واقعی همخوانی دارد و حتی این روند دقیق‌تر است. در مقابل، دقت پیش‌بینی HMM بی نهایت انعطاف‌پذیر است.

با توجه به مسیرهای زوال زنجیره‌ای، پیش‌بینی مشاهدات خطی نیستند و منجر به یک منحنی عمر باقیمانده پیش‌بینی شده زنجیره‌ای می‌شود(شکل ۶). رویکرد HMM با مشاهدات همبستگی خودکار در مدل‌سازی زوال منطقی و مناسب است. به‌طور خاص، خطاهای نسبی مشاهدات پیش‌بینی شده، مربوط به این دو تاریخچه داده در بالا در مقابل زمان در شکل ۶ نشان داده شده است که می‌توان نتیجه گرفت خطای نسبی مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف در طول زمان کوچکتر می‌شود، در حالی که خطای نسبی HMM به‌طور قابل ملاحظه‌ای نوسان دارد تا زمانی که بزرگ شود. با مشاهدات بیشتر و در دسترس، ارتباط خودکار مشاهدات بیشتر می‌شود و دقت پیش‌بینی مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف بالا و بالاتر می‌رود. با این‌حال، خطای نسبی HMM در نهایت بدون درنظر گرفتن همبستگی خودکار بزرگتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف با رفتار فرآیند زوال واقعی، نسبت به HMM بهتر است (شکل ۶).

با بررسی تمام ۲۰ مسیر زوال مربوط به ۲۰ نمونه، می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود که تقریباً برای همهٔ نمونه‌ها، RMSE (خطای جذر میانگین مربع) پیش‌بینی مشاهدات کوچکتر از مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف HMM است. از این‌رو کاربرد مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف گسترده است. برای توضیح بیشتر اثر تأخیر خودکار بر دقت پیش‌بینی، پیش‌بینی توالی مشاهدات نیمهٔ دوم همهٔ نمونه‌ها مدنظر

می‌باشند. همان‌طور که همبستگی مشاهدات در طول زمان بیشتر و بیشتر می‌شود، مدل زنجیرهٔ پنهان مارکوف به‌خوبی برای مدل‌سازی زوال و پیش‌بینی عمر باقیمانده است. پس از بررسی تأثیر رویکرد پیشنهادی در یک مورد واقعی، سعی می‌شود استفاده و علاقهٔ پیش‌بینی عمر باقیمانده در برنامه‌های مهندسی بررسی شوند. نگهداری پیشگیرانه یک ناحیه، کاربردی ضروری از عمر باقیمانده است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توجه به وضعیت خرابی جادهٔ جنگلی با توجه به اطلاعات وضعیت زوال جاده و دو شاخص روسازی PCI و FRPCI در دورهٔ زمانی متوالی و با استفاده از مدل زنجیرهٔ مارکوف پنهان در دورهٔ ۱۰ ساله، نتایج نشان داد اگر مسیر زوال به شدت یکنواخت باشد، مقادیر پیش‌بینی شده عمر باقیمانده باید به‌شدت یکنواختی کاهش یابد و در نتیجه، دقت بهبود می‌یابد. در این مورد، می‌توان از یک روش جایگزین (ε برای کاهش نوسانات) استفاده نمود. از آنجاکه دقت پیش‌بینی روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر حالت، کم‌تر از روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر مشاهدات است بنابراین پیش‌بینی عمر باقیمانده s در روش پیش‌بینی عمر باقیمانده مبتنی بر حالت، کوچکتر از عمر باقیمانده واقعی به‌نظر می‌رسد. این موضوع نتایج بهره‌وری این روش را برجسته می‌کند و علاقه به استفاده از آن در نگهداری پیشگیرانه را نشان می‌دهد که در آن لازم است، برنامه‌ریزی عملیات نگهداری قبل از شکست انجام شود. همچنین نتایج نشان داد روند زوال جاده از کلاسهٔ عالی به خوب از روند تغییرات آن از کلاسهٔ متوسط به ضعیف، به‌مراتب سریع‌تر است. بیشترین درصد تعداد قطعات جاده به‌صورت گسیخته و کمترین تعداد، قطعات با وضعیت عالی می‌باشند. پیش‌بینی می‌شود با توجه به اجرای طرح تنفس و عدم تخصیص بودجه در طی یک دورهٔ ۱۰ ساله، جاده با یک شیب تند نزولی به زوال کامل برسد (شکل ۳). این موضوع با نتایج مطالعه Ahrari و همکاران (۲۰۲۲)، در رابطه با کیفیت عملکردی جاده و کیفیت با استفاده از زنجیرهٔ مارکوف درخصوص روند زوال همسو است، اما با توجه به اینکه خطای مدل در مطالعهٔ مذکور برآورد نگردیده است، قابل مقایسهٔ آماری نمی‌باشد. نتایج، ضرورت تخصیص بودجهٔ کافی و فوری جهت نگهداری و تعمیر و نگهداری جاده‌های موجود را نشان می‌دهد و اینکه مدل شناخته شده با توجه به خطای کم (مقادیر RMSE) پیش‌بینی عملکرد زنجیرهٔ مارکوف قابلیت‌های لازم جهت پیش‌بینی دقیق روند زوال جاده را دارا می‌باشد (شکل ۴). به استناد آمار و ارقام و اطلاعات به‌دست آمده و مشاهدات عینی، قابل پیش‌بینی است که مطالعات ارزیابی زوال روسازی و همچنین خرابی‌های کلی گستردهٔ جادهٔ جنگلی در بازهٔ زمانی بیشتر و طولانی‌تر، نتایجی به‌مراتب دقیق‌تر و با قدرت استناد بیشتری از ارزیابی کوتاه مدت ۲ یا ۳ سالهٔ آینده به ما می‌دهد و ضرورت دارد، سایر مدل‌های پیش‌بینی هم بررسی و مطالعه شوند. نتایج به‌دست آمده این پژوهش می‌تواند راهنمای مجریان، سیاست گذاران و دست اندرکاران امر تعمیر و نگهداری جاده در عرصه جنگلی باشد تا امکان پیش‌بینی تمهیدات لازم و ضروری جهت برنامه‌ریزی مناسب زمانی تعمیر و نگهداری و توجه به حالت‌های گذار وضعیت کیفی قطعات یک جادهٔ جنگلی از شرایط عالی به بد و گسیخته و دلایل وقوع این امر را فراهم نماید (Pedro Marcelino 2020 *et al.*,). نتایج این مطالعه و استفاده از مدل شناخته‌شده پیش‌بینی عملکرد زنجیرهٔ مارکوف، می‌تواند در برنامه‌های حال حاضر و آینده کارشناسان و طراحان و مهندسان جاده‌های جنگلی مؤثر عمل نموده و از تحمیل بار اضافی هزینه‌های ناخواسته و اتلاف وقت و نابودی سرمایه‌های ملی کشورمان جلوگیری نماید. گسترش بیشتر مدل زنجیری پنهان مارکوف به تشخیص خطا در سیستم‌های تولید، موضوع مناسبی برای تحقیقات آینده است. یکی دیگر از موضوعات جالب توجه، توسعی مدل‌های زوال و سیاست‌های نگهداری براساس مدل پیشنهادی می‌باشد. علاوه براین، HMM ها بیان می‌کنند که وضعیت

فعلی تنها به حالت قبلی وابسته است، این نشان می‌دهد که توزیع‌های مدت حالت ثابت یا هندسی می‌باشند. مدل‌سازی طول زمان وضعیت‌های پنهان در آینده ضروری است. بنابراین مدل مربوطه بیشتر قادر به فرآیندهای زوال واقعی است. با توجه به نتایج مطالعهٔ حاضر و سری زمانی داده‌های برداشت شده در دو دوره مختلف، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اولاً امکان مدل‌سازی با توجه به درنظر گرفتن متغیرهای پنهان در روش HMM وجود دارد، یعنی می‌توان فاکتورهایی مثل بودجه‌های انقباضی را به مدل وارد کرد و ثانیاً می‌توان پیش‌بینی کرد که با رویکرد کنونی تا چه میزان زوال جاده مورد انتظار است (شکل ۷). مدل ارائه‌شده تلفیقی از مـدل «مارکوف پنهان» و «زنجیرهٔ مارکوف» است که در پـیش‌بینـی زوال روسازی جاده‌های جنگلی مناسب بوده و نتایج نیز حاکی از عملکرد مناسب مدل ارائه‌شده در این تحقیق می‌باشد.

تقدیر و تشکر

برخود لازم می‌دانیم، از تمام کارگران و کارشناسان محترم، همه عزیزانی که برای انجام این مطالعه در تمام قسمت‌ها و ارزیابی و بهبود آن همکاری مؤثر داشتند و این پژوهش را برای رسیدن به اهداف مطلوب آن یاری نمودند و از معاونت محترم پژوهشی دانشکده منابع طبیعی و دانشگاه تهران، تقدیر و سپاسگزاری به عمل آوریم.

References

Abdi, E., Soofi Mariv, H., Fathi, J., 2012. Measuring the in situ California Bearing Ratio of a new constructed forest road using DCP. Iranian Journal of Forest and Poplar Research 20(2), 183-193 (In Persian)

Ahrari, Sh., Najafi, A., Hosseinzadeh Kashan, A., 2022, Predicting the deterioration of forest roads using the Markov chain (Case study: West Haraz Forest), Iranian Forest Journal, Iranian Forestry Association 13(1), 85-73. (In Persian)

Asgari, S., Najafi, A., Alavi, S.J., 2016, Introduction of FRPCI index and evaluation of forest road pavement using this index, 3rd Congress of Agricultural Sciences and Natural Resources on the Road to Development, Farhangian University, Golestan Province, Gorgan, Iran. 5 p. (In Persian)

Elhadidy, A.A., Elbeltagi, E.E., Ammar, M.A., 2015. Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms. Housing and Building Natinal Research Center Journal 11(1), 107-113.

FRWO. 2002. Aghuzchal Series 3 Forestry Plan Booklet. Forests, Rangelands and Watershed Management Organization. 379 p. (In Persian)

FRWO. 2013. The first revision booklet of Aghuzchal series 3 forestry plan. Tarbiat Modares University Noor. 316 p. (In Persian)

FRWO. 2017. Rangelands and Watershed Management Organization, Strategic document on sustainable management of northern forests in implementation of Article 38 of the Sixth Development Plan Law. 50 p. (In Persian)

Ghajar, I., Pooremam, 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), 77-89.

Ghavidel, P., Naghdi, R., Ghajar, I., Mirzaei, M., 2021. Evaluation of pavement distress on forest road curves (Case study: Shanderman watershed). Forest Research and Development 7(2), 249-261.

Goodarzi, R., Najafi, A., 2017. Using Multi-Criteria Decision Making Method in Management of Forest Road Pavement Maintenance. Journal of Forests and Wood Products, Iranian Journal of Natural Resources 70(4), 636-627. (In Persian)

Guan. D., Gao, W., Watari. K., Fukahori, H. 2008. Land Use Change of Kitakyushu Based on Landscape Ecology and Markov Model, Journal of Geographical Sciences, 18(4), 455-468.

Heidari, M J., Najafi, A., Alavi, S.J., 2015, Study of road protrusion as an important factor in the deterioration of forest road pavement, International Conference on Research in Engineering, Science and

Technology, Turkey. 8 p.

Heidari, M.J., Najafi, A., Alavi, S., 2017. The effect of equivalent axial load factor on the deterioration of forest road pavement. Iranian Forest Journal, Iranian Forestry Association 9(1), 143-131 (In Persian)

Heidari, M.J., Najafi, A., Alavi, S.J., 2016. Identifying the level of forest road pavement warning and its management using genetic algorithm. Iranian Journal of Forest and Poplar Research 24(4), 587-577. (In Persian)

Heidari, M.J., Najafi, A., Alavi, S.J., 2018. Pavement Deterioration Modeling for Forest Roads Based on Logistic Regression. Croatian Journal of Forest Engineering 39(2), 271-278

Hosseini, S.A., Mohammadnejad, A., Lotfalian, M., Pourmajidian, M., 2010, Evaluating the cost of forest road operations using existing standard principles and field harvesting. Quarterly Journal of Forest and Wood Products (Iranian Natural Resources). 63(3), 240-229. (In Persian)

Kazemi, B., Khabiri, M M., 2016, A Review of the Application of Computational-Probabilistic Chain Markov Method in Predicting the Deterioration of Pavement , Civil Engineering Group, Yazd University, Yazd, Vol. 13 (New Series), No. 2, 19-26

Martin, T., Choummanivong, L., Thoresen, T., 2013. Deterioration and maintenance of local roads. International Public Works Conference, Darwin, Northern Territory, Australia**.** Pagination**,** 11 p.

Pedro Marcelino, Maria de Lurdes Antunes, Eduardo Fortunato & Marta Castilho Gomes, 2020. Transfer learning for pavement performance prediction, International Journal of Pavement Research and Technology volume 13, 154-167

R Core Team. 2021. R: A, Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www. R-project.org/

Tabatabaei S.A., Khoorani, H., 2012. Transfer Matrix Method in Predicting Future State Markov Pavement Using Matlab, Quarterly Transportation Technology Journal. Road and Urban Ministry of Iran. 18, 37-44. (In Persian)

Talebi, M., Majnonian, B., Abdi, E., Allahian, M.R., 2015, Assessment of road protection and maintenance in Arasbaran region, Journal of Forests and Wood Products, Iranian Journal of Natural Resources 68(2), 613-591. (In Persian)

Visser, R., McGregor, R., Fairbrother, S., 2009. Forest Road Pavement Design in New Zealand. In: 32nd Annual Meeting of the Council on Forest Engineering (COFE 09). University of Canterbury. School of Forestry, USA. pp: 15-18

Wang, P., Liu, B., Zhao, T., Cao, P., 2021. Optimization Method of Equipment Maintenance Resource Schelduling Based on Hidden Semi-Markov Model. Monitoring and Control (ANMC) cooperate: Xi'an Technological University (CHINA) West Virginia University (USA) Huddersfield University of UK (UK), International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls 6(2), 23-31.