مروری بر مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی

پدرام باقریان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
کیوان آقابیک*، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول : Kayvan.Aghabayk@ut.ac.ir
دریافت: ۹۶/۰۶/۲۰- پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۵
صفحه ۱۳-۲۱

چکیده

زیرساخت‌های حمل‌ونقلی سرمایه‌های ملی هر کشور محسوب می‌شوند. شبکه‌های جاده‌ای از مهم‌ترین زیرساخت‌های حمل‌ونقلی می‌باشند، که مقدار زیادی از بودجه‌ها صرف هزینه‌های ساخت، بهره برداری، تعمیر و نگهداری آنها می‌شود. روسازی این جاده‌ها نیاز به نگهداری مداوم دارند و تحت شرایط محیطی و ترافیکی همواره روبه زوال‌اند. در کشورهایی که اکثر جابجایی‌ها از طریق شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای صورت می‌گیرد، اهمیت یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد و مدرن مشهودتر است. در واقع مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد، قدرت تخمین شرایط آینده بر اساس وضعیت فعلی و ارایه اقدامات پیش‌گیرانه است. در هر روسازی همیشه یک زمان بهینه انجام اقدامات تعمیر و بهسازی وجود دارد. چنانچه اقدامات لازم در این مرحله صورت نگیرد، سرعت رشد خرابی‌ها و هزینه‌های نگهداری با نرخ شدیدتری افزایش می‌یابند. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی بهترین ابزار برای تعیین این زمان بهینه می‌باشند. در این مقاله، در مورد لزوم استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی بحث شده و انواع مدل‌ها معرفی شده و نقاط ضعف و قوت آنها ارایه شده است. همچنین با بررسی دقت پیش‌بینی و کارایی این مدل‌ها و بررسی ضوابط کالیبراسیون آنها و همچنین میزان داده‌ها و امکانات مورد نیاز هر یک از آنها به مقایسه دقیق آنها پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم مدیریت روسازی، عملیات تعمیر و نگهداری، مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی، اقدامات پیش‌گیرانه

۱ - مقدمه

روسازی جاده‌ها به طور طبیعی تحت بارهای ترافیکی و شرایط محیطی در حال فرسایش و زوال می‌باشد. در صورت عدم وجود اقدام به موقع و نبود عملیات تعمیر و نگهداری کافی، روند تخریب این روسازی‌ها شدت خواهد یافت، که این امر منجر به کاهش شدید کیفیت سواری و ایمنی استفاده‌کنندگان می‌شود. زمانی که فعالیت‌های تعمیر و نگهداری به موقع انجام نشود، نیاز به بهسازی و حتی بازسازی گسترده‌ای خواهد بود. در واقع این عملیاتی که با تاخیر انجام می‌گیرد، هزینه‌ای بیشتر از تعمیر و نگهداری ساده و کم هزینه‌ای که می‌توانست زودتر انجام شود، در بر خواهند داشت (مقدس‌نژاد، ۱۳۸۷). با شناخت روند و چگونگی کاهش خدمت روسازی می‌توان تمهیدات و منابع لازم را برای جلوگیری از تسریع فرایند تخریب و زوال پیش‌بینی نمود (Molenaar, 2003). منظور از زوال می‌تواند تغییرات کلی سطح خدمت‌دهی روسازی یا تغییرات یک نوع خاص خرابی مانند ترک خستگی و یا یک شاخص کلی مانند PCI در طول زمان

باشد. البته قابل ذکر است که علت تغییرات عملکرد روسازی تنها عامل زمان نبوده و متغیرهای ترافیک، خصوصیات مصالح و شرایط آب و هوایی نیز بر عملکرد روسازی تاثیر می‌گذارد (Kerali, 1994). مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد، قدرت تخمین شرایط آینده بر اساس وضعیت فعلی و ارایه اقدامات پیش‌گیرانه است. در هر روسازی همیشه یک زمان بهینه انجام اقدامات تعمیر و بهسازی وجود دارد. چنانچه اقدامات لازم در این مرجله صورت نگیرد، سرعت رشد خرابی‌ها و هزینه‌های نگهداری با نرخ شدیدتری افزایش

می‌یابند. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی بهترین ابزار برای تعیین این زمان بهینه می‌باشند (Kerali, 1994). به صورت ایده آل، یک مدل پیش‌بینی عملکرد بایستی روند خرابی روسازی را به صورت جامع بیان کند و تمام فاکتورهای تاثیرگذار آن را مد نظر قرار دهد (مقدس‌نژاد، ۱۳۸۷).

در حال حاضر مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی بسیاری موجود می‌باشند، که دارای ساختار متفاوت هستند. همچنین تطبیق این مدل‌ها با داده‌های تاریخچه زمانی موجود، اثرات محیطی، مشخصات آزمایشگاهی زمان ساخت و لیست عملیات ترمیم و نگهداری سازمان‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت است. با وجود پیشرفت‌های اخیر، هنوز یک تخمین دقیق و صحیح از عمر روسازی ممکن نیست. علت این عمر دشوار بودن تعیین عوامل تاثیرگذار بر عملکرد روسازی است (Haas, Hudson and Zaniewski, 1994). از جمله مدل‌های اصلی و اساسی پیش‌بینی عملکرد روسازی می‌توان به مدل‌های مارکوفی، HDM-III، HDM-4، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و مدل PHT اشاره کرد.

۲ – پیشینه مدل‌ها

تاریخچه پیدایش مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی به دهه ٦٠ باز می‌گردد (Kerali, 1994). در طول سال‌های متمادی مدل‌های متعددی پیشنهاد شدند، که تعدادی از آنها ساده و بعضی دیگر پیچیده‌تر بودند (Haas, 2003). در سه دهه گذشته شاهد یک افزایش علاقه در توسعه مدل‌های عملکرد روسازی بودیم. اگرچه مدل‌های عملکرد روسازی ممکن است شکل‌های متفاوتی داشته باشند، ولی عموما هسته کلی آنها یکسان است. همه مدل‌ها نشانگرهای وضعیت روسازی مانند شاخص ترک خوردگی، ناهمواری، شیارشدگی و ... را به متغیرهای مستقل اولیه مثل بارهای ترافیکی، فاکتورهای محیطی، چرخه، سن و ساختار روسازی مرتبط می‌کنند (Kerali, 1994). مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی را می‌توان به دو دسته سنتی و مدرن تقسیم کرد، که شامل موارد زیرند (Haas, Hudson and Zaniewski, 1994):

۱ – مدل‌های سنتی مثل HDM-III و مدل مارکوف که در گذشته بیشتر کاربرد داشتند.

۲ – مدل‌های مدرن مثل مدل HDM-4، شبکه عصبی مصنوعی و مدل PHT که در دو دهه اخیر پرکابردتر بوده‌اند.

مدل‌های سنتی دارای اشکالاتی از قبیل محدودیت‌های کاربرد و دقت پایین پیش‌بینی، عدم پیش‌بینی افزایش حجم ترافیک، نیاز به محاسبات و زمان اجرایی زیاد و ... بودند (Kerali, 1994). در نتیجه در سال‌های اخیر مدل‌های سنتی توسعه داده شده و اصلاح شدند و مدل‌های جدیدی ایجاد شدند، که تا حدودی با هدف بهبود و کاهش ضعف مدل‌های قبلی عمل کردند. این مدل‌ها دارای قابلیت مدل‌سازی بالا و خطای کم هستند و به دلیل در نظر گرفتن متغیرهای ورودی زیاد دارای دقت بالایی هستند (Kerali, 1994).

همچنین مدل‌های پیش‌بینی عملکردی را می‌توان از لحاظ ساختار به سه دسته زیر طبقه‌بندی کرد (Haas, 2003):

–مدل‌های قطعی

–مدل‌های احتمالی

–مدل‌های بیولوژیکی

در مدل‌های قطعی فرم تابعی به صراحت مشخص می‌باشد و دارای روابط ثابت و مشخص می‌باشند. مدل‌های HDM-III و HDM-4 و PHT از این دسته مدل‌ها هستند. مدل‌های قطعی به سه گروه تقسیم می شوند (Robinson, Snaith and Danielson, 1998).

در مدل‌های احتمالی تغییرات ذاتی مشخصه‌های مصالح، وضعیت محیطی، مشخصه‌های ترافیکی و ماهیت ذهنی بررسی

شرایط عملکرد روسازی یک پروسه اتفاقی است (مقدس‌نژاد، ۱۳۸۷). مدل‌های احتمالی، معیارهای وضعیت روسازی مانند PCI و یا خرابی را به عنوان متغیر تصادفی در نظر می‌گیرند. معروف‌ترین مدل این گروه زنجیره مارکوف است (Yang et al., 2005). مدل‌های مرسومی که در گروه مدل‌های بیولوژیکی قرار دارند شامل الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشند (Haykin, 1994). اولین قدم به منظور ایجاد یک مدل ارزیابی پروژه‌های راه در سال ۱۹٦۸ توسط بانک جهانی صورت گرفت. اولین مدل در جریان یک مطالعه در زمینه طراحی بزرگراه توسط بانک جهانی و با همکاری آزمایشگاه تحقیقات راه و حمل‌ونقل (TRRL) و آزمایشگاه تحقیقات راه فرانسه (LCPC) انجام می‌گرفت، ایجاد شد (Paterson, 1987). در سال ۱۹۷٦، بانک جهانی بودجه مربوط به توسعه HCM در دانشگاه MIT را پرداخت کرد، تا اولین نسخه مدل استانداردهای طراحی و نگهداری بزرگراه (HDM) تولید شود (Jorge and Ferreira, 2011). پروژه‌های بعدی که در کشورهای مختلف انجام گرفت دامنه جغرافیایی مدل HDM را توسعه داد. بانک جهانی به منظور کالیبره کردن مدل‌ها و به ویژه ارزیابی کارایی برنامه HDM، اقدام به مطالعات صحرایی گسترده‌ای در کشورهای حوزه دریای کارائیب، هندوستان و برزیل نمود و نسخه اصلاح‌شده را تحت عنوان HDM-III، در سال ۱۹۸۷ عرضه کرد (Kerali, 1994). از سال ۱۹۹۳ به بعد مطالعات گسترده‌تری آغاز شد، تا مدل‌ها و نحوه استفاده از آنها بهینه شود. به همین دلیل مطالعات صحرایی و میدانی گسترده‌ای در برخی کشورها (حدود ۳۰ کشور) انجام شد و نسخه جدید با نام HDM-4 در سال ۱۹۹۸ تهیه گردید. نسخه اولیه مدل HDM-4 در سال ۲۰۰۰ تکمیل گردید و در سال ۲۰۰۲ ورژن ۲ و نهایی مدل منتشر شد (Uddin khan and Odoki, 2010). در واقع نام مدل از مدل استاندارد نگهداری و طراحی راه به ابزار توسعه و مدیریت بزرگراه‌ها تغییر پیدا کرد (Jorge and Ferreira, 2011). مدل مارکوف پرکاربردترین مدل احتمالی برای پیش بینی عملکرد روسازی می‌باشد (Yang et al., 2005). مدل اصلی و اولیه مارکوف برای پیش‌بینی روند خرابی روسازی تحت قرارداد USA-CERL اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط کین توسعه داده شد. مدل‌های احتمالاتی مارکوفی به طور گسترده برای ارایه مدل‌های خرابی روسازی به کار رفته‌اند (Ross, 2010). به عنوان مثال می‌توان به مطالعات انجام یافته توسط کولکارنی ۱۹۸٤(Kulkarni, 1984)، بات و همکاران ۱۹۹٤(Butt et al., 1994)، مدانات و همکاران ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷(Madanat, Mishalani and Wan Ibrahim, 1995) و ... اشاره کرد (Yang et al., 2005).

مدل PHT یک ابزار و برنامه کاربردی مهندسی برای تعیین و گزارش سلامت شبکه‌های روسازی است، که تحت حمایت اداره مدیریت دارایی FHWA قرار دارد (Federal Highway Administration, 2013). در سال ۲۰۰۳ یک قرارداد به نام "اصلاح سیستم جمع‌آوری داده‌های عملکرد راه FHWA و مدل‌های عملکرد روسازی" ایجاد شد. هدف این قرارداد تحقیق در مورد روش‌های توسعه مدل‌های عملکردی توسعه یافته ولی ساده برای سیستم مورد نیاز اقتصادی راه (HERS) بود. این پروژه به عنوان یک تلاش چندساله و نتیجه‌دار بود، که در نهایت به استفاده از مدل‌های عملکردی MEPDG انجامید. در نهایت نسخه نهایی این مدل در اواسط دهه ۲۰۰۰ منتشر شده و در ایالت‌های امریکا مورد استفاده مدون قرار گرفت (Titus-Glover et al., 2010). شبکه‌های عصبی مصنوعی در بسیاری از موارد تحقیقی و در تخصص‌های گوناگون به کار گرفته شده‌اند و به عنوان یک زمینه تحقیقاتی بسیار فعال موجبات همکاری دانشمندان در چند زمینه علمی از قبیل مهندسی کامپیوتر، برق، عمران و صنایع را فراهم نموده است. از موارد کاربرد شبکه‌های عصبی می‌توان به طبقه‌بندی اطلاعات، شناخت ویژگی‌های حروف و شکل‌ها، برآورد توابع و ... اشاره نمود. کاربرد شبکه عصبی در مهندسی عمران روز به روز در حال افزایش است (منهاج، ۱۳۸٤). امروزه شبکه‌های عصبی به طور گسترده در بخش‌های مختلف مهندسی راه از جمله طراحی روسازی، پیش‌بینی‌های ترافیکی، تخمین در حمل‌ونقل کالا و مسافر، مدیریت روسازی و ... به کار گرفته می‌شود (Adeli, 2001). معماری شبکه عصبی شامل تعیین متغیرهای ورودی وخروجی، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌ها در هر لایه می‌باشد (منهاج، ۱۳۸٤) از جمله مطالعات در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های آتو اوکین

و همکاران (Attoh, Okine, 1998)، شخاران (Shekharan, 1998)، اووسو آبابیو (Owusu, Ababio, 1998) و لوو و همکاران (Lo et al., 1998) اشاره کرد.

۳ – تشریح مدل‌ها

در این پژوهش به بررسی و مقایسه فنی و کاربردی ۵ مدل اصلی و اساسی پیش‌بینی عملکرد روسازی پرداخته شده است. این ۵ مدل شامل مدل مارکوف، HDM-III، HDM-4، مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل PHT می‌باشند. در این بررسی به دقت و کارایی مدل‌ها، داده‌ها و امکانات مورد نیاز و هزینه‌های اجرایی پرداخته می‌شود.

۳ – ۱– مدل HDM-III

یک مدل قطعی است و دارای روابط ثابت و یک نرم‌افزار مخصوص است. متغیرهای این مدل که برای تحلیل روسازی‌های آسفالتی به کار می‌رود، به شرح زیر می‌باشد (Watanatada, 1987):

پارامترهای ورودی: مشخصه‌های محیطی – پارامترهای ترافیکی – مشخصات هندسی راه – مشخصات آزمایشگاهی مصالح – لیست اقدامات پیش‌گیرانه

متغیرهای پیش‌بینی شده: ترک‌ها بدون تفکیک نوع آن – ازهم-پاشیدگی – چاله‌شدگی – شیارشدگی – شاخص IRI

بررسی‌های خرابی و روابط این مدل به این گونه است که خرابی‌های سطحی مانند (ترک‌ها، ازهم‌پاشیدگی و چاله‌شدگی) در دو فاز (مرحله آغاز خرابی و مرحله گسترش خرابی) مشخص شده‌اند. در این روابط برخی اشکالات و محدودیت‌ها از جمله دقت پایین پیش‌بینی، عدم کاربرد مناسب برای روسازی بتنی و ... وجود داشتند که کاربرد آن را محدود کرده است (Watanatada et al., 1987).

۳ – ۲– مدل HDM-4

نقص‌های موجود در مدل HDM-III باعث شد مدل HDM-4 در جهت بهبود و ایجاد قابلیت‌های زیر به کار رود (Kerali, Mcmullen and Odoki, 2001).

اثرات آب‌وهوای خیلی سرد و گستردگی محدوده دمایی درنظرگرفتن دامنه گسترده‌تری از خرابی‌ها و ساختار روسازی گستردگی اثرات محیطی افزایش دقت زیرمدل‌های اثر ترافیک بر عملکرد روسازی مطابق انتظار مدل HDM-4 نسبت به HDM-III دارای دقت بیشتری است و مقبولیت بالاتری در بین استفاده کنندگان دارد. به شرطی که دسترسی به داده های خرابی های جدیدی که اضافه شده است، امکان پذیر باشد (Kerali, 1994). HDM-4 نیز یک مدل قطعی است و دارای روابط ثابت و یک نرم‌افزار مخصوص است. متغیرهای این مدل که برای تحلیل روسازی‌های آسفالتی به کار می‌رود، به شرح زیر می‌باشند (Kerali, 1994):

پارامترهای ورودی: مشخصه‌های محیطی – پارامترهای ترافیکی – مشخصات هندسی راه – مشخصات آزمایشگاهی مصالح – لیست اقدامات پیش‌گیرانه.

متغیرهای پیش‌بینی شده: ترک سازه‌ای – ترک انعکاسی – ترک عرضی حرارتی – ازهم‌پاشیدگی – چاله‌شدگی – شیارشدگی – شکستگی لبه – شاخص IRI مدل‌های HDM-III و HDM-4 به دلیل شکل یکسان روابطشان، روش کالیبراسیون یکسانی دارند. در این مدل‌ها ۷ عامل باید کالیبره شوند و ضرایب آنها با تغییر شرایط و محیط تغییر کند. این عوامل به ۲ بخش تقسیم شدند. عوامل با حساسیت بالا، شامل عامل محیطی ناهمواری، عامل آغاز ترک و عامل گسترش ترک و عوامل با حساسیت پایین شامل عامل گسترش عمق شیار، عامل گسترش کلی ناهمواری، عامل گسترش چاله‌شدگی و عامل آغاز ازهم‌پاشیدگی می‌باشند. در این دو مدل برای تمام روابط یک ضریب به عنوان ضریب کالیبراسیون اثر داده می‌شود (Kerali, Mcmullen and Odoki, 2001) و (Watanatada et al., 1987).

۳ – ۳– مدل مارکوف

مدل‌های مارکوفی از جمله مدل‌های اولیه و سنتی محسوب می‌شوند و دارای دقت زیادی نیستند. این مدل دارای روابط ثابت یا نرم‌افزار مخصوص نمی‌باشد. پارامترهای این مدل به این گونه است که اکثر خرابی‌های موثر روسازی به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند. شاخص PCI به عنوان خروجی

این مدل در نظر گرفته می‌شود (Yang et al, 2005). روند این مدل یک رویکرد زمانی گسسته تصادفی می‌باشد. در زنجیره مارکوفی احتمال انتقال از یک حالت به حالت دیگر را احتمال انتقال می‌نامند. با بررسی روند تغییرات خرابی‌ها و شاخص‌ها در گذشته احتمالات انتقال به صورت یک ماتریس (ماتریس احتمال انتقال) نشان داده می‌شود (Winston, 1994). در واقع ماتریس احتمال انتقال تمامی احتمالات بین دو حالت در روسازی را شامل می‌شود (Winston, 1994).

برای کاربرد این مدل نیاز به کالیبراسیون بر اساس داده‌های هر منطقه می‌باشد. در واقع این مدل با بررسی مقادیر PCI چند سال متوالی (حدود ۱۰ سال برای این مقدار مناسب است) روند تغییرات آن را مشخص می‌کند و همین روند را برای سال‌های آینده در نظر می‌گیرد. در واقع این اقدام همان عمل کالیبراسیون است (Ross, 2010).

۳ – ٤– مدل شبکه عصبی مصنوعی

یک مدل بیولوژیکی است که تا حدودی تلفیقی از مدل‌های احتمالی و قطعی می‌باشد. هر مدل شبکه عصبی مصنوعی بر اساس ساختار معماری آن تعریف می‌شود. معماری شامل تعیین متغیرهای ورودی وخروجی، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌ها در هر لایه می‌باشد. معمولاً یک شبکه عصبی که تعداد نرون‌های کمی در لایه یا لایه‌های پنهان دارد، از توانایی کمتری برخوردار است. چنانچه تعداد نرون‌ها بسیار زیاد شود، در کنار دقت بالای پیش‌بینی، ممکن است پیچیدگی بیش از حد شبکه مشکل‌ساز شود (منهاج، ۱۳۸٤). مزیت اصلی این مدل گستردگی کاربرد آن، سرعت عملیات بالا و دقت پیش‌بینی به وسیله آن است (Adeli, 2001). لایه ورودی شامل پارامترهایی است که در پروسه خرابی روسازی نقش اساسی ایفا می‌کنند. این پارامترها به صورت کلی شامل پارمترهای ترافیکی، پارامترهای محیطی، ظرفیت سازه‌ای و سن روسازی هستند، که البته در مطالعات مختلف می‌توانند اختلافات اندکی داشته باشند (Bosurgi and Trifiro, 2005). در خروجی مدلی که برای پیش‌بینی روسازی راه به کار می‌رود، از شاخص IRI یا PCI استفاده شده است. هر شبیه‌سازی تابعی از اطلاعات مسیر بوده که بر روی آنها محاسبات صورت می‌گیرد و پس از تحلیل و پردازش، نتیجه به صورت یک عدد بیان می‌شود، که نشان‌دهنده وضعیت روسازی است (Ferregut, 1999). معمولاً در مدل شبکه عصبی مصنوعی از خرابی‌های مدل HDM-4 استفاده می‌کنند. یعنی خرابی‌های مورد بررسی برای روسازی آسفالتی ترک‌ها، ازهم‌پاشیدگی، شیارشدگی، شکستگی لبه، چاله‌شدگی و ناهمواری و برای روسازی بتنی شکستگی درز عرضی، خردشدگی درز، ترک خوردگی عرضی و ناهمواری هستند. در واقع برای هرکدام از این خرابی‌ها یک مدل ANN جداگانه تشکیل داده و با استفاده از داده‌های چندین سال پارامترهای موثر را در ورودی قرار داده و خروجی تک نرون ما همان خرابی مورد نظر می‌باشد (Ferregut, 1999). روند کالیبراسیون این مدل به این صورت است که با جمع‌آوری چند مورد از داده‌های خرابی چند سال پیاپی و قرار دادن در پروسه آموزش روند مدل به دست می‌آید. به همین دلیل این مدل نیز نیاز به پایگاه داده بسیار قوی دارد. روندی مانند مدل مارکوف دارد با این تفاوت که در مدل شبکه عصبی مصنوعی با مانور دادن روی تعداد ورودی‌ها و تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های آنها به حالت بهینه می‌رسد (Adeli, 2001).

۳ – ۵– مدل PHT

یک مدل قطعی است و دارای روابط ثابت و یک نرم‌افزار مخصوص است. متغیرهای این مدل که برای تحلیل روسازی‌های آسفالتی به کار می‌رود، به شرح زیر می‌باشد (Federal Highway Administration, 2013):

پارامترهای ورودی: مشخصه‌های محیطی – پارامترهای ترافیکی – مشخصات هندسی راه – مشخصات آزمایشگاهی مصالح

متغیرهای پیش‌بینی شده: ترک پوست‌سوسماری – ترک عرضی – شیارشدگی – شاخص IRI

ساختار این مدل تا حدودی شبیه مدل HDM-4 است با این تفاوت که طرز کار آن و محاسبات مربوط به عمر باقی‌مانده متفاوت می‌باشد. این مدل در محاسبات عمر خدمت‌دهی، تاثیر همه متغیرها را یکسان در نظر نمی‌گیرد و برای متغیرهای ترک پوست‌سوسماری، ترک عرضی، شیارشدگی و شاخص IRI به ترتیب ضرایب تاثیر ۰/۲۵، ۰/۱۰، ۰/۲۵ و ۰/٤۰ را در نظر

می‌گیرد (Titus-Glover et al., 2010). در این مدل با هدف ساده‌تر شدن محاسبات و نیاز به پایگاه داده با گستردگی کمتر، مهم‌ترین خرابی‌های موثر بر عملکرد روسازی در نظر گرفته شده و خرابی‌های با اهمیت کمتر از محاسبات حذف شده‌اند. با تاثیر دادن بیش از یک ضریب کالیبراسیون در روابط و محیطی کردن آنها، سعی در افزایش دقت روابط شده است (Battelle, 2010). در واقع با استفاده از تجربیات موجود در استفاده از مدل‌های قطعی استفاده شده در گذشته، این مدل ایجاد شده است. نرم‌افزار آماده و مخصوص این مدل توسط FHWA منتشر شده است که بسیار پیشرفته و دارای کاربردهای فراوانی است. این نرم‌افزار قابلیت ارایه گراف‌های گسترش خرابی‌ها و ناهمواری در گذر زمان و همچنین ارایه برنامه زمان‌بندی عملیات نگهداری و تعمیر را دارد (Federal Highway Administration, 2013). این مدل دارای سه سطح کالیبراسیون می‌باشد، که بر اساس میزان داده‌های در دسترس قابل کاربرد می‌باشند. هر چه سطح کالیبراسیون بالاتری انتخاب شود، داده‌های بیشتر و برای دوره‌های زمانی متمادی مورد نیاز است و به موازات آن دقت مدل نیز بالاتر می‌رود. در کالیبراسیون سطوح ۲ و ۳ که توسط FHWA نیز توصیه شده است، ضرایب زیادی از هر رابطه تغییر کرده و تا حدودی روابط تغییر پیدا کرده و مخصوص همان منطقه می‌شود. بر خلاف دیگر مدل‌های قطعی، این سطح‌بندی کالیبراسیون فقط در مدل PHT استفاده می‌شود (Federal Highway Administration, 2013).

٤ – مقایسه کلی مدل‌ها

با بررسی دقیق و کاربردی مدل‌ها مشخص شد که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت کلی می‌باشند. در واقع با توجه به موارد بالا، چون دو مدل مارکوف (برای حالت‌های کالیبراسیون سطح بالا) و شبکه عصبی مصنوعی به داده‌های چند سال متوالی نیازمندند، نیاز به پایگاه داده گسترده‌ای دارند. در واقع این مدل‌ها در صورتی مناسبند، که یک مطالعه بلندمدت صورت گیرد و داده‌های مربوطه به مدت ۸ الی ۱۰ سال متوالی برداشت شود. اما ۳ مدل دیگر برای اکثر مناطق قابل کاربردند. مدل HDM-III دارای نواقص و محدودیت‌های زیادی است و قابلیت پیش‌بینی بالایی ندارد. در مقایسه دو مدل HDM-4 و PHT، چون به هم نزدیک هستند، نیاز به بررسی و مقایسه جزئی‌تری است. خلاصه این مقایسه‌ها در جدول ۱ در صفحه بعدی ارایه شده است.

۵ – نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۵ مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این بررسی‌ها دقت مدل، پایگاه داده مورد نیاز، نحوه محاسبات، قابلیت کاربرد در شرایط مختلف و امکانات مورد نیاز مورد لحاظ واقع شده است. مدل‌های قطعی نسبت به دیگر مدل‌ها مقبولیت بیشتری در بین سازمان‌ها دارند. در این بین مدل HDM-III دارای اشکالاتی نظیر دقت کم پیش‌بینی، کابرد در شرایط محدود و ضعف زیاد در پیش‌بینی برخی خرابی‌ها از جمله شیارشدگی بود. مدل HDM-4 با اضافه کردن چند مورد جدید خرابی، گسترده کردن کاربرد مدل برای انواع روسازی‌ها و افزایش کارایی مدل‌های ترافیکی ضعف نسخه قبلی خود را از بین برد. با این حال در این مدل نیز برای کالیبراسیون حجم بالایی از داده‌های خرابی مورد نیاز است. مدل PHT دارای ساختاری شبیه به مدل HDM-4 می‌باشد ولی برخی خرابی‌هایی که تاثیر کمتری بر عملکرد روسازی دارند، از مدل حذف شده و در نتیجه برای کالیبراسیون به داده‌های کمتری نیاز است. همچنین این مدل تاثیر همه خرابی‌ها را یکی نگرفته و به آنها ضریب تاثیر داده است. مدل PHT امروزه در اکثر کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد و برخی کشورهای در حال توسعه نیز به این نتیجه رسیدند که این مدل بهترین انتخاب است و در حال توسعه مدل PHT مخصوص کشور خود می‌باشند. مدل‌های احتمالی مانند مارکوف نیاز به محاسبات و زمان اجرایی زیادی دارند و نرم‌افزار آماده و قابل استفاده‌ای هم ندارند. همچنین این مدل تنها یک شاخص PCI را پیش‌بینی کرده و به بررسی تک تک خرابی‌ها نمی‌پردازد. مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای دقت بسیار بالایی است. اما این مدل به حجم بالایی از داده‌ها برای دوره‌های متوالی نیاز دارد که ممکن است در بسیاری از سازمان‌ها این امکانات موجود نباشد. در واقع دقت بالای این مدل در گرو گستردگی پایگاه داده می‌باشد.

جدول ۱. خلاصه مقایسه مدل‌ها

نوع مدل	نقاط قوت	نقاط ضعف
HDM-III	۱ – سادگی و کاربرد آسان و محاسبات ساده ۲ – در نظر گرفتن وضعیت ترک‌های روسازی در گذشته و تاثیر دادن آن در روابط	۱ – دقت پیش‌بینی کمتر از مدل‌های دیگر ۲ – عدم کارایی برای روسازی‌های بتنی ۳ – عدم تفکیک مناسب برای پیش‌بینی ترک ٤ – پیش‌بینی شیارشدگی بسیار ضعیف ۵ – تاثیر یکسان خرابی‌ها و ناهمواری در عملکرد روسازی
HDM-4	۱ – در نظر گرفتن دامنه خرابی گسترده‌تری نسبت به مدل HDM-III و کمتر نسبت به دو مدل مارکوف و ANN (متعادل) ۲ - در نظر گرفتن وضعیت ترک‌های روسازی در گذشته و تاثیر دادن آن در روابط ۳ – برای انواع مختلف روسازی‌ها قابل کاربرد است	۱ – دقت آن به نسبت مدل‌های ANN و بعضا PHT پایین‌تر است. ۲ – تاثیر یکسان خرابی‌ها و ناهمواری در مدل
مارکوف	۱ – یک مدل احتمالی است و در شرایطی که داده‌های دقیق موجود نیست قابل کاربرد است. ۲ – استفاده از شاخص PCI که دقت بالایی دارد.	۱ – نیاز به محاسبات و زمان اجرایی زیاد دارد. ۲ – این نکته که چرخه عمر هرسال مخرب‌تر می شود در نظر گرفته نشد. ۳ – در این مدل فقط صرفا یک شاخص پیش‌بینی می‌شود و در نهایت خرابی‌ها به صورت تکی بررسی نمی‌شوند.
PHT	۱ – یک مدل قطعی است و اساس کار آن شبیه مدل HDM-4 است، ولی اصلاحاتی در آن صورت گرفته، دقت و کارایی مدل افزایش یافته است. ۲ – نسبت به مدل HDM-4 متغیرهای کمتری را در نظر گرفته و به پایگاه داده ساده‌تری نیازمند است. ۳ – متغیرهای ترافیکی به صورت گسترده و قوی در روابط اثر داده شده. ٤ – یک برتری مهم مدل PHT این است که تاثیر همه خرابی‌ها را یکی نگرفته و به آنها ضریب تاثیر داده است. ۵ – نرم‌افزار آن نسبت به دیگر مدل‌ها بسیار پیشرفته‌تر و دارای امکانات گسترده‌تری است. ٦ – این مدل امروزه در کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد و برخی کشورهای در حال توسعه نیز به این نتیجه رسیدند که این مدل بهترین انتخاب است و در حال توسعه مدل PHT مخصوص کشور خود هستند.	۱ – این مدل از روسازی‌های بتنی فقط نوع JPCP را پوشش می‌دهد ، که از نقاط ضعف اصلی این مدل است.
ANN	۱ – از دیگر مدل‌ها دارای دقت بیشتری است. ۲ – در این مدل دست استفاده‌کننده برای انتخاب ورودی‌ها باز است و بسته به شرایط می‌توان از موارد مختلف بهره برد .	۱ – حجم زیادی از اطلاعات ورودی مورد نیاز است و به پایگاه داده بسیار گسترده‌ای نیاز است . ۲ – در این مدل فقط صرفا یک شاخص پیش‌بینی می‌شود و در نهایت خرابی‌ها به صورت تکی بررسی نمی‌شوند

٦ – مراجع

-مقدس نژاد ، ف.، (۱۳۸۷)،"چهارچوب سیستم مدیریت روسازی راه‌ها در ایران"، پژوهشکده حمل و نقل.

-منهاج، م.ب. (۱۳۸٤)، "مبانی شبکه‌های عصبی"، جلد اول، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

-A. A. Butt, M. Y. Shahin, S. H. Carpenter, and J. V. Carnahan, (1994), "Application of Markov process to PMS at network level". 3rd Int. Conf. on Managing Pavements, Vol. 2, National Academy Press, Washington, D.C., pp.159–172.

-Adeli, Hojjat. "Neural networks in civil engineering :(1989–2000)," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 16.2 (2001): pp.126-142.

-Battelle/ARA. (2010), "Pavement Health Track (PHT) RSL Forecasting Models", Technical Information.

-Diana Jorge & Adelino Ferreira (2011), "Road network pavement maintenance optimization using the HDM-4 pavement performance prediction models , International Journal of Pavement Engineering.

-Enhancement of the Pavement Health Track (PHT) Analysis Tool ,(2013), "Federal Highway Administration".

-Ferregut, Carlos, et al. (1999), "Artificial neural network-based methodologies for rational assessment of remaining life of existing pavements." Center for Highway Materials Research, The University of Texas at El Paso. Texas Department of Transportation.

-G. Bosurgi & F. Trifirò , (2005), "A model based on artificial neural networks and genetic algorithms for pavement maintenance management" , International Journal of Pavement Engineering.

-Haas, R., Hudson, W. R., Zaniewski, J. P. (1994), "Modern Pavement Management".

-Haas, R., (2003), "Good technical foundations are essential for successful pavement management", key note paper, proceedings of MAIREPAV' 03, Guimaraes, Portugal.

-Haykin S., (1994), "Neural Networks: A Comprehensive Foundation, MacMillan".

-Henry G., R.Kerali, Overview of Hdm-4, Volume one, Highway department and management

-Henry G., R. Keralli, (1994), Application Guide, HDM-4 Documentation, Volume4.

-Henry G.R. kerali, (2001), "Derek Mc Mcmullen, J.B. odoki, Highway Development & Management Manual", HDM –4, Volume 1,2,4.

-Lo, S-CB, et al. (1995), "Artificial convolution neural network techniques and applications for lung nodule detection." IEEE Transactions on Medical Imaging 14.4, pp.711-718.

-Misbah Uddin Khan and Jennaro B. Odoki, (2010),"Establishing optimal pavement maintenance standards using the HDM-4 Model for Bangladesh", Journal of Civil Engineering.

-Molenaar, A.A.A. (2003), "Pavement performance evaluation and rehabilitation design", key note paper, Proceedings of MAIREPAV' 03, Guimaraes, Portugal.

-Titus-Glover, L., C. Fang, M. Alam, K. O'Toole, and M. I. Darter, (2010), "Pavement Health Track (PHT), Remaining Service Life (RSL) Forecasting Models", Technical Information. Federal Highway Administration, Washington DC.

-W. L. Winston, (1994),"Operations research applications and algorithms". 3rd Ed., Duxbury, Belmont, Calif.

-Watanatada, T., Harral, C. G., Paterson, W. D. O., Dhareshwar, A. M., Bhandari, A., Tsunokawa,
K., (1987), "The Highway Design and maintenance Standards Model, volume1 – Description of the HDM-III Model", The highway design and maintenance standards series, Published for The World Bank.

-Yang, J., et al., (2005), "Use of recurrent Markov chains for modeling the crack performance of flexible pavements". Journal of Transportation Engineering.

-Owusu, Ababio, Sam. (1998), "Effect of neural network topology on flexible pavement cracking prediction." Computer, Aided Civil and Infrastructure Engineering 13.5 (1998): pp.349-355.

-Paterson, W. D. O., (1987), "Road Deterioration and Maintenance Effects, the highway design and maintenance standards series", Published for The World Bank.

-R. B. Kulkarni, (1984),"Dynamic decision model for a pavement management system". Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.11–18.

-Roberts, Craig A., and Nii O. Attoh Okine (1998), "A comparative analysis of two artificial neural networks using pavement performance prediction." Computer□Aided Civil and Infrastructure Engineering 13.5: pp.339-348.

-Robinson R., Snaith M. S. And Danielson U., (1998), "Road Maintenance Management: Concepts and Systems". Macmillan, Basingstoke.

-Ross, M. S., (2010), "Introduction to Probability Models", 10th Edition.

-S. Madanat, R. Mishalani, W. H. Wan Ibrahim, (1995), "Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data", Journal of Infrastructure Systems, ASCE.

-Shekharan, A. (1998), "Effect of noisy data on pavement performance prediction by artificial neural networks." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1643, pp. 7-13.