

## مدل‌سازی شاخص وضعیت روسازی (PCI) با استفاده از رگرسیون خطی

### چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی

#### مقاله پژوهشی

امین فرج‌اللهی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران  
محمد رضا احدی\*، دانشیار، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، تهران، ایران  
عباسعلی طایفی نصرآبادی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.ahadi@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۴/۱۷ - پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۲

صفحه ۶۰-۴۷

#### چکیده

یکی از مهمترین اهداف یک سیستم مدیریت روسازی، تعیین اولویت‌ها و زمان بهینه برای تعمیرات، از طریق پیش‌بینی وضعیت روسازی است. در واقع هدف سیستم مدیریت روسازی (PMS)، ترمیم و نگهداری در مراحل نخستین خرابی و صرفه‌جویی در هزینه‌هاست. از این رو در این پژوهش به منظور تعیین شاخص وضعیت روسازی (PCI)، دو مدل رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی را برآزش داده و قدرت تخمین آنها مقایسه گردید. در این راستا خرابی‌های سه آنزادراه کربلا، پل زال و تهران - قم مورد بررسی قرار گرفته، تا بدین وسیله بتوان روش مناسب برای پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی، به منظور شناسایی بهینه‌ترین زمان تعمیر و نگهداری در جهت کاهش هزینه‌های آن، شناسایی گردد. برای دستیابی به هدف مورد نظر برای ارزیابی قطعات (واحد‌های نمونه) از نرم‌افزارهای Micropaver و برای ساخت مدل‌ها از نرم افزار MATLAB و SPSS استفاده گردید. به منظور برداشت خرابی‌های واحد‌های نمونه به فواصل ۱۰۰ متر و قطعات به فواصل ۵۰۰ از این مسیر برداشت شد. متغیرهای مورد بررسی در تحلیل مدل‌ها شامل: طول عمر قطعه در زمان بازرسی (ماه)، عرض واحد نمونه، متوسط AADT در طول عمر قطعه، متوسط درصد وسایل نقلیه سنگین در طول عمر قطعه، بیشینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶، کمینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶ و ضخامت روسازی (سانتی‌متر) می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده میزان عملکرد مدل شبکه عصبی بر اساس شاخص میانگین مربعات خطا (MSE) و همچنین شاخص  $R^2$  که به ترتیب برابر است با ۰٫۹۵ و ۰٫۸۷ می‌باشد که در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه (۰٫۱۳۹) دارای اعتبارسنجی بیشتری جهت پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی می‌باشد. علاوه بر آن با توجه به مدل شبکه عصبی می‌توان دریافت طول عمر قطعه بیشترین اهمیت را در ساخت شبکه عصبی داشته (۰٫۵۵) و پس از آن بیشینه دما (۰٫۱۲۲) و درصد وسایل نقلیه سنگین (۰٫۱۲۰) متغیرهای مهم بعدی در پیش‌بینی وضعیت روسازی راه‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص وضعیت روسازی، پیش‌بینی، شبکه عصبی، خرابی

#### ۱-مقدمه

کاربردهای مهم سیستم مدیریت روسازی می‌باشد (Deshmukh, 2010, Alavi et al, 2016). در واقع هدف سیستم مدیریت روسازی (PMS)، ترمیم و نگهداری در مراحل نخستین خرابی و صرفه‌جویی در هزینه‌هاست (Shahin, 2005, Beck et al, 2010). این روش

یکی از سوالاتی که تصمیم‌گیرندگان برنامه‌های تعمیر و نگهداری راه‌ها با آن مواجه هستند رفتار عملکرد روسازی در طول سال‌های متعادل در کشورهایشان هستند. پیش‌بینی مقادیر مشخصه‌های مختلف مانند وضعیت خرابی و عملکرد روسازی با استفاده از شاخص‌های سنجش، یکی از

یا کیفیت روسازی را به صورت تابعی از زمان و یا تابعی از ترافیک تبیین نماید (Haas, Hudson and Zaniewski, 1994). مفهوم عملکرد روسازی، طیف وسیع و گستردهای را شامل می‌شود. از شاخص‌های ترکیبی مانند شاخص وضعیت روسازی<sup>۲</sup> (PCI) شاخص خدمت‌دهی فعلی روسازی (PSI)<sup>۳</sup> و شاخص کیفیت راه (PQI)<sup>۴</sup> گرفته تا فقط یک خرابی یا یک خصوصیت مانند ناهمواری، ترک خوردگی، شیارافتادگی و غیره می‌توانند نشان‌دهنده وضعیت راه باشند (Robinson, Danielson and Snaith, 1998). از جمله رایج‌ترین مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی، مدل مارکوف است که در نرم‌افزار MicroPaver استفاده شده است. این مدل جزو مدل‌های احتمالی طبقه‌بندی می‌شود و بر اساس ایده خانواده روسازی شکل گرفته است. در مدل مارکوف یک ماتریس احتمال انتقال و وضعیت روسازی بر اساس ارزیابی‌های قبلی تهیه شده و احتمال وقوع یک وضعیت خاص در آینده پیش‌بینی می‌شود. این مدل بر اساس جمع‌آوری اطلاعات انواع روسازی‌ها طی بیش از سی سال تهیه شده است و یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در دنیاست. بیش از ۸۰٪ فرودگاه‌هایی که سیستم مدیریت روسازی دارند از MicroPaver استفاده می‌کنند. ماتریس انتقال در این مدل شامل دو بردار است. بردار  $P_i$  احتمال باقی‌ماندن در وضعیت  $i$  و بردار  $q_i$  احتمال انتقال از وضعیت  $i$  به وضعیت  $i+1$  است ( $p_i+q_i=0$ ). همچنین بردار  $Q_0$  احتمال قرار داشتن روسازی در ابتدای کار (چرخه خدمت صفر) در هر یک از حالت‌های وضعیت را مشخص می‌کند. اگر ماتریس انتقال با  $T$  مشخص شود، آنگاه وضعیت روسازی در چرخه  $n$ ام به صورت  $X_n=Q_0.T^n$  محاسبه می‌شود. مقادیر احتمالات  $p_i$  و  $q_i$  به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که مقادیر پیش‌بینی شده  $(X_n)$  با مشاهدات تجربی  $(Y_n)$  کمترین اختلاف را داشته باشند. در این نرم افزار مسئله بهینه سازی رابطه (۱) با الگوریتم فلچر-پاول حل شده است. شیب غیر مثبت در منحنی عملکرد به عنوان قید این مسئله تعریف شده است

$$\text{Min } \sum_n \sum_j | Y_{(n,j)} - E[X_{(n,j)}] | \quad (1)$$

$$\text{S.t. } X_{(n,j)} \geq X_{(n,j+1)} \quad (2)$$

سیستماتیک به کمک ارزیابی عمیق از وضعیت فعلی روسازی و پیش‌بینی وضعیت آن در آینده، امکان انتخاب اقتصادی‌ترین استراتژی ترمیم و نگهداری و مناسب‌ترین زمان اجرا را فراهم می‌آورد. شاخص‌های بررسی وضعیت روسازی در نوع، میزان و نحوه ورود اطلاعات از یکدیگر متمایز بوده و هرکدام به طریقی دسترسی و استفاده ساده‌تر از اطلاعات را در آینده ممکن می‌سازند (et al, 2016). مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی مهم‌ترین بخش از یک سیستم مدیریت روسازی بشمار می‌رود. تمام برنامه‌های بلندمدت و میان مدت تعمیرات راه بر مبنای پیش‌بینی‌هایی است که از وضعیت آینده روسازی صورت می‌گیرد. بنابراین، اثر بخشی این برنامه‌ها وابسته به صحت و اعتبار مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی است. برای این منظور روشهای بسیار متنوعی تا کنون پیشنهاد شده‌اند و در پروژه‌های اجرایی نیز بکار رفته‌اند. برای دست یافتن به یک تخمین مناسب لازم است که روسازی راه حداقل سه تا پنج سال متوالی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان نحوه تغییر کیفیت آن را به خوبی مدل کرده و بر اساس مدل‌سازی، وضعیت آینده آن را پیش‌بینی نمود. بنابراین، در سال‌های اولیه راه اندازی یک سیستم مدیریت روسازی، دقت برنامه‌ها چندان مناسب نخواهد بود. ایده استفاده از خانواده روسازی با این هدف انتخاب شده است که بتوان از ابتدا به دقت خوبی در مدل‌سازی دست یافت. در مدل‌های خانواده، چندین روسازی که از لحاظ شرایط فنی مشابه یکدیگرند و از لحاظ روند افت کیفیت از یک الگو تبعیت می‌کنند، در یک گروه قرار گرفته و مدل پیش‌بینی عملکرد برای مجموعه آن‌ها ساخته می‌شود. به دلیل این که مجموعه روسازی‌های داخل یک خانواده عمر بهره برداری و کیفیت‌های متفاوتی دارند، بنابراین منحنی افت کیفیت را به خوبی در اولین سال ارزیابی می‌توانند مشخص نمایند. هر چه روسازی‌های یک خانواده عمر بهره‌برداری وسیع‌تری را پوشش دهند، مدل‌سازی دقت بیشتری خواهد داشت. مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی باید چگونگی افت کیفیت روسازی را در طول زمان بهره برداری تشریح نماید. افت کیفی روسازی (یا رشد و گسترش خرابی‌ها) دلیل ترافیک و هم به دلیل عوامل اقلیمی اتفاق می‌افتد. بنابراین مدل باید بتواند خرابی‌های راه

که در آن:

$n$  - تعداد چرخه‌های خدمت روسازی

$Y(n,j)$  - مقدار مشاهده شده PCI روسازی در

چرخه خدمت  $n$

$X(n,j)$  - مقدار پیش بینی شده PCI روسازی در چرخه

خدمت  $n$

در تحقیق Karasahin و Terzi به ماهیت نامعین و عدم

قطعیتی که در داده‌های ورودی یک مدل پیشبینی عملکرد

روسازی وجود دارد، توجه شده است. به همین دلیل از

رویکرد فازی برای مدلسازی استفاده شده است. متغیرهای

ورودی شامل مشخصات عمومی راه و خرابی‌های روسازی

است که در قالب متغیرهای کلامی تعریف شده‌اند و نیاز به

ارزیابیهای کمی و آزمایشگاهی ندارند. خرابی‌های مختلف بر

اساس تاثیر آنها در افت کیفیت روسازی وزن دهی شده‌اند.

با استفاده از روابط منطق فازی خروجی مدل یعنی شاخص

سرویس دهی راه محاسبه می‌گردد. مطالعه موردی در چندین

جاده مختلف نشان می‌دهد که این مدل از دقت بسیار خوبی

برخوردار است (Kaasahin and Terzi, 2014). در

تحقیق و Setyawan و همکاران رابطه بین شاخص وضعیت

روسازی با عمر باقیمانده روسازی بررسی شده است. با

یافتن یک رابطه مناسب بین این دو پارامتر، نویسندگان بجای

مدلسازی شاخص PCI اقدام به مدلسازی عمر باقیمانده

نموده‌اند تا زمان مناسب روکش و تعمیرات اساسی را

پیشبینی نمایند (Setywan et al, 2015). در تحقیق

Vavrik و Premkumar از مدل‌های پیش بینی عملکرد

روسازی در جاده‌های بین شهری استفاده شده است. با توجه

به داده‌های میدانی، مدل‌های قبلی با در نظر گرفتن نتایج

آزمون‌های FWD کالیبره و اصلاح شده‌اند. نتیجه نهایی

تحقیق این است که به جای پیش بینی شاخص وضعیت

روسازی، در اینجا هم عمر باقیمانده روسازی محاسبه

می‌شود. تا مبنایی برای تعیین زمان روکش و تعمیرات اساسی

باشد (Premkumar and Vavrik, 2016). در مقاله

Sollazo و همکاران از یک شبکه عصبی مصنوعی برای

پیش بینی عملکرد سازه‌های روسازی استفاده شده است. در

این مقاله ابتدا ارتباط بین مشخصات سازه‌های راه با ناهمواری

سطح آن بررسی شده و سپس با اندازه گیری ناهمواری شبکه

راهها اقدام به پیشبینی مشخصات سازه روسازی نموده است.

بدین ترتیب با افزایش عمر بهره برداری از راه و افزایش

ناهمواریهای آن، روند افت کیفیت سازه‌ای روسازی نیز

برآورد می‌شود. در این مقاله از داده‌های LTPP<sup>۵</sup> به عنوان

بانک اطلاعاتی برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است.

همچنین در این مقاله مشخص شده است که نتایج حاصل از

شبکه عصبی نسبت به تخمین با روش رگرسیون از دقت

بیشتری برخوردار (Sollazo et al. 2017). سالم و

همکاران (۲۰۰۳) برای پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی به

بررسی هزینه‌های زیرساخت در طول عمر، به بررسی مدل

هزینه بر پایه ریسک و هزینه شکست در طول چرخه و

ترمیم روسازی پرداختند (Salem et al, 2003). در

مطالعات دیگر با روش آنالیز هزینه چرخه عمر (LCCA)<sup>۶</sup>

به پیش‌بینی وضعیت روسازی پرداختند که منجر به کاهش

هزینه‌های تعمیر و نگهداری در سال‌های آتی گردید. (et al,

H. Zhang 2016: M. Nazzal et al, 2016: Chan et

al, 2008).

آرامیلا و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به ارایه مدلی به

منظور پیش‌بینی عملکرد روسازی بزرگراه ایالت مریلند با

استفاده از شاخص ناهمواری بین المللی (IRI)<sup>۷</sup> و انواع تابع

رگرسیون چند جمله‌ای درجه ۳ تا درجه ۵ پرداختند که نتایج

نشان داد شاخص مورد بررسی شاخص مناسبی بوده است

(Arambula et al, 2011).

امین و همکاران در مطالعات خود با هدف افزایش کارایی

سیستم مدیریت روسازی به بررسی شبکه راه‌های جاده‌ای

آتلانتیک کانادا پرداختند نتایج نشان داد استفاده از تعاملات

اقتصادی (مدل‌های پیش‌بینی تقاضا) و شبکه عصبی به عنوان

معیار ترمیم و نگهداری روسازی مناسب می‌باشد (Amin et

al, 2016: Amin et al, 2014: al, 2014). کروزا و همکاران (۲۰۱۶)

در بررسی تعمیر و نگهداری روسازی راه با استفاده از

شاخص PCI بر روی یک منطقه مسکونی در رم، ایتالیا

انجام شد نتایج نشان داد که با استفاده از شاخص PCI و

شاخص وضعیت پیاده رو (SCI)<sup>۸</sup> می‌توان افزایش ایمنی

عابر پیاده را تأمین گردد (Corazza et al, 2016). در

مطالعه دیگر Alrashyidah و همکاران (۲۰۱۸) برای ارایه

یک رویکرد مناسب برای افزایش مخلوط‌های آسفالت و

ارایه دو مدل پیش‌بینی، یکی با آنالیز رگرسیون چندگانه و

دیگری با شبکه‌های عصبی مصنوعی به جلو (ANN)<sup>۹</sup>. این

دو مدل برحسب زمان بار، دما، تغییر آسفالت، سطح

مدل‌سازی شاخص وضعیت روسازی (PCI) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی پرداخته تا بدین وسیله بتوان روش مناسب برای پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی جهت شناسایی بهینه‌ترین زمان تعمیر و نگهداری به منظور کاهش هزینه‌های روسازی شناسایی گردد.

### روش تحقیق

برای دستیابی به هدف مورد نظر در این پژوهش و برای ارزیابی قطعات (واحدهای نمونه) روسازی از شاخص وضعیت روسازی «PCI» استفاده گردید. برای این منظور این تحقیق در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت: ۱- محاسبه PCI وضعیت موجود با استفاده از فرمول ارائه شده توسط FAA و خرابی‌های راه ۲- محاسبه PCI با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی با داده‌های تغییر پذیر در طول عمر روسازی و مقایسه قدرت تخمین آن‌ها.

### روش PCI

روش PCI روش عینی و قابل تکرار برای ارزیابی روسازی راه‌هاست. این روش که در ابتدا توسط گروه مهندسين ارتش ایالات متحده توسعه یافت، مقبولیت وسیعی نزد بسیاری از سازمان‌ها در سرتاسر دنیا از جمله اداره کل هوانوردی فدرال، وزارت دفاع آمریکا<sup>۱۱</sup> (FAA) پیدا کرد. PCI یک شاخص عددی است که مقدار آن از صفر (برای یک روسازی غیر قابل استفاده) تا صد (برای یک روسازی کاملاً بی‌عیب) تغییر می‌کند. جدول ۱ حدود وضعیت کیفی روسازی را بر حسب مقادیر مختلف PCI نشان می‌دهد.

جدول ۱. تغییرات کیفی روسازی بر اساس شاخص PCI (۱۴)

رد	خراب	خیلی ضعیف	ضعیف	نسبتاً خوب	رضایت بخش	خوب
۰	۱۰	۲۵	۴۰	۵۵	۷۰	۸۵-۱۰۰

این شاخص تابعی از نوع، شدت و وسعت خرابی می‌باشد (فرمول ۲) (Sherwani, 2011).

$$PCI = c - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m g(T_i, S_j, D_{ij}) f(t, d) \quad (2)$$

حفره‌های هوا و شرایط پیری ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که دو مدل پیشنهادی را می‌توان برای پیش‌بینی رفتار انطباق خزش HMA استفاده کرد. با این حال، دقت پیش‌بینی مدل ANN ی آتی نسبت به مدل رگرسیون چندگانه بسیار بهتر است (Alrashyda et al, 2018). در یک مقاله دیگر، با استفاده از یک پایگاه داده بزرگ از برنامه عملکرد آسفالت بلند مدت، نویسندگان یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را برای تخمین عملکرد ساختاری پیاده‌روهای آسفالت از داده‌های زبری ایجاد کردند. با در نظر گرفتن مزایای دستگاه‌های بررسی عملکرد پیشرفته مدرن در مالکیت شبکه‌های جاده آسفالت جاده، اگر وضعیت ساختاری یک پیاده‌رو می‌تواند از شرایط عملکردی آن برآورد شود، از اهمیت عملی برخوردار خواهد بود. برای تمایز بین شرایط بخش جاده‌ای مختلف، چندین پارامتر ورودی مهم مرتبط با ابعاد ترافیک، آب و هوا و جنبه‌های ساختاری در این تحلیل گنجانده شده‌اند. نتایج بسیار جالب هستند و ثابت می‌کنند که ANN از مدل anadequate برای نشان دادن این رابطه استفاده می‌کند (Sollazz et al, 2017).

### ۲-اهداف تحقیق

یکی از مهمترین اهداف یک سیستم مدیریت روسازی، تعیین اولویت‌ها و زمان بهینه برای تعمیرات، از طریق پیش‌بینی وضعیت روسازی است. عدم نگهداری به موقع و شایسته راه‌ها باعث افزایش نرخ خرابی، نابودی سریع راه و تحمیل هزینه‌های بهره‌برداری (از قبیل استهلاک وسایل نقلیه، تأخیر در حمل‌ونقل بار و مسافر، افزایش میزان سوخت مصرفی، افزایش آمار تصادفات) می‌شود. از این رو در این پژوهش به

حسب اثر تجمعی عوامل مختلَب کاهش کیفیت روسازی (t) و تعداد آنها (d) تغییر می‌کند.

### توسعه مدل‌ها

#### مدل رگرسیون خطی چندگانه

ساختار مدل رگرسیون خطی در فرمول ۳ نشان داده شده است:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \epsilon_i, \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

که در آن:

$Y_i$  = متغیر وابسته در مکان یا قطعه  $i$  ام

$X_{ik}$  = بیانگر متغیر مستقل  $k$  ام (به عنوان مثال، حجم ترافیک عبوری) در قطعه  $i$  ام

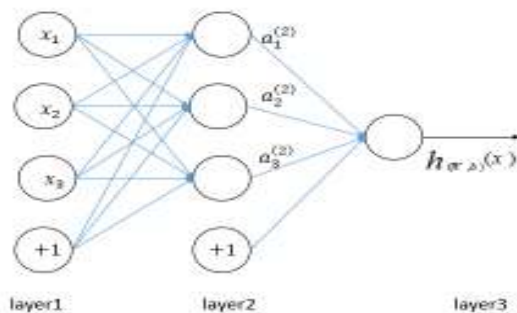
$\beta_k$  = بردار پارامترهای (ضرایب) مجهول رگرسیون با ترانهاد  $\beta' = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$

$\epsilon_i$  = بردار خطای مدل که مقادیر آن دارای توزیع مستقل می‌باشند

### ۳- شبکه عصبی انتشار برگشتی (BPNN)

انتقال به کار رفته در لایه‌ها، نحوه تاثیر وزن‌ها بر ورودی‌ها و چگونگی تولید خروجی شبکه، انواع مختلفی از الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی معرفی شده است. متداولترین نوع این شبکه‌ها، شبکه عصبی شبکه‌های چند لایه پرسپترون با الگوریتم آموزش انتشار برگشتی (BPNN) می‌باشد. که نمونه ساخت اولیه شبکه به صورت زیر می‌باشد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی از اجزایی موسوم به سلول‌های عصبی تشکیل شده‌اند. هر سلول عصبی مصنوعی شامل یک سری ورودی، یک سری خروجی و تعداد زیادی گره یا واحد پردازشگر می‌باشد. واحد پردازشگر یک نوع تابع ریاضی است که به تابع انتقال موسوم است. تابع انتقال براساس نوع آن بر ورودی‌های شبکه تاثیر گذاشته و سپس خروجی سلول عصبی را تولید می‌کند. بر اساس نوع توابع



شکل ۱. ساختار اولیه شبکه عصبی

این پژوهش وضعیت روسازی سه آزادراه کربلا، پل زال و تهران - قم در کشور ایران را مورد بررسی قرار می‌دهد. به منظور برداشت خرابی‌های واحدهای نمونه به فواصل ۱۰۰ متر و قطعات به فواصل ۵۰۰ از این مسیر برداشت شد که این به معنی تعداد کل نمونه در هر قطعه ۵ می‌باشد. انواع خرابی‌های مشاهده شده شامل وصله، ترک طولی و عرضی، چاله، ترک سوسماری، نشست زیر چرخ، قیرزدگی، هوازگی و نشست می‌باشد که نمونه‌ای از آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. آزادراه کربلا نام آزادراهی در مرکز ایران حد فاصل استان‌های مرکزی و همدان است. طول این آزادراه در حدود ۱۷۰ کیلومتر است که شهر ساوه را به همدان وصل می‌کند. این آزادراه در تاریخ ۱ دی ۱۳۸۵ به بهره‌برداری رسیده است. که از کیلومتر ۹۰ تا ۱۷۰ آن در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. آزادراه پل زال در حد فاصل دو شهر خرم‌آباد و اندیمشک به طول ۱۰۴ که در تاریخ ۱۳۹۲/۰۸/۱۱ مورد بهره‌برداری قرار گرفته و برای آزادراه تهران-قم نیز از کیلومتر ۱ تا ۱۳۰ آن در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. تاریخ بازرسی و برداشت اطلاعات از هر سه آزادراه در تاریخ ۹۶/۶/۱۵ انجام گرفته است.

شکل ۱ از دایره برای نشان دادن ورودی‌های شبکه استفاده شده است. دایره ای که با عدد +۱ نشاندار شده واحد اریبی نامیده می‌شود و معادل با عرض از مبدا مدل می‌باشد. سمت چپ‌ترین لایه شبکه، لایه ورودی و سمت راست‌ترین لایه شبکه لایه خروجی نام دارد. لایه میانی نرون‌ها لایه پنهان نامیده می‌شود چرا که مقادیر آن قابل مشاهده نیستند. در مثال موجود در شکل فوق شبکه در لایه ورودی ۳ گره (واحد اریبی شمارش نمی‌شود)، در لایه پنهان ۳ گره و در لایه خروجی نیز یک گره دارد. از  $n_l$  برای نشان دادن تعداد لایه‌های شبکه استفاده می‌شود. بنابراین در این مثال  $n_l = 3$ ،  $l_1$  لایه ورودی و  $l_{n_l}$  لایه خروجی می‌باشد. همچنین این شبکه دارای پارامترهای وزن و اریبی به ترتیب زیر است (فرمول ۴):

$$(w^{(1)}, b^{(1)}, w^{(2)}, b^{(2)}) \quad (4)$$

## مطالعه موردی

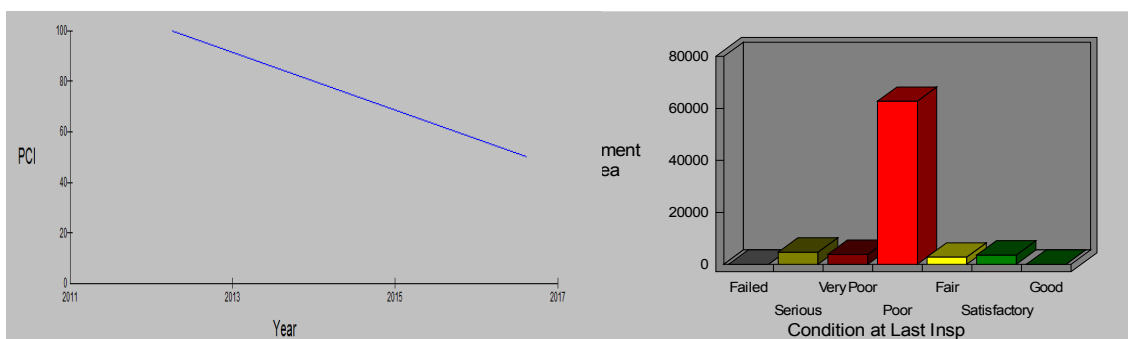


شکل ۲. خرابی‌های مشاهده شده در سه آزادراه کربلا، زال و تهران-قم

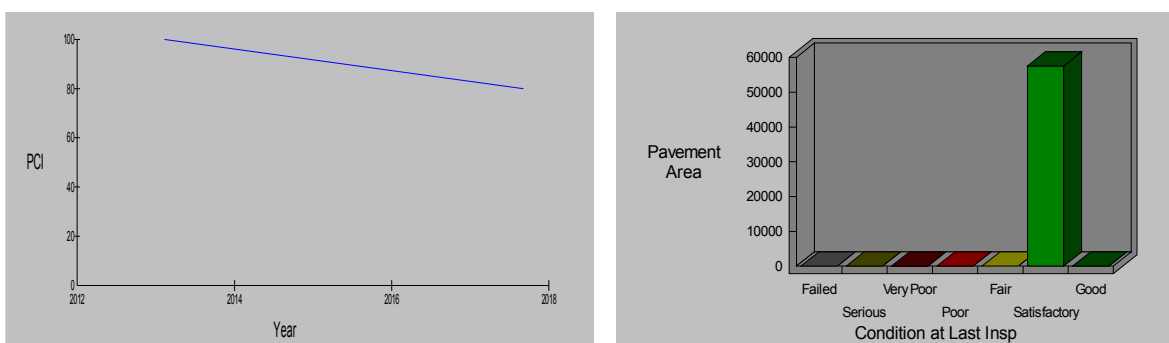
بر اساس استاندارد (ASTM (D5340-98 هر قطعه به چند واحد نمونه تقسیم و براساس PCI محاسبه شده، برای واحدهای نمونه انتخابی، PCI قطعه، محاسبه می‌شود. بر اساس انواع خرابی‌های برداشت شده که در بخش ۲،۲ بیان شد شاخص وضعیت روسازی هر یک نمونه‌های این آزاد راهها با استفاده از نرم افزار Micro Paver محاسبه گردید نمونه از محاسبات وضعیت روسازی برای قطعه کیلومتر ۱۰۳-۱۰۴ از آزاد راه کربلا که مقدار pci آن برابر ۵۰ (Poor) (شکل ۳-الف) و برای قطعه کیلومتر ۳۶-۳۷ از آزاد راه پل زال که مقدار pci آن برابر ۸۰ (Satisfactory) (شکل ۳-ب) و برای قطعه کیلومتر ۳۸-۳۹ از آزاد راه تهران - قم که مقدار pci آن برابر ۳۲ (Very Fair) (شکل ۳-ج) نشان داده شده است.

بعد از برداشت مختصات و خرابی نمونه‌های همه قطعات در نظر گرفته شده و بدست آوردن «شدت خرابی»، «میزان خرابی» و «کل خرابی» PCI هر واحد نمونه محاسبه گردید. برای این منظور از نرم افزار Micropaver استفاده شد. در ادامه به منظور محاسبه PCI در وضعیت آینده دو مدل رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی انتشار برشتی با استفاده از داده‌های تغییرپذیر در دوره‌های زمانی آینده (ترافیک، دما، عمر روسازی و...) برازش داده شد و قدرت تخمین این روش‌ها بررسی گردید.

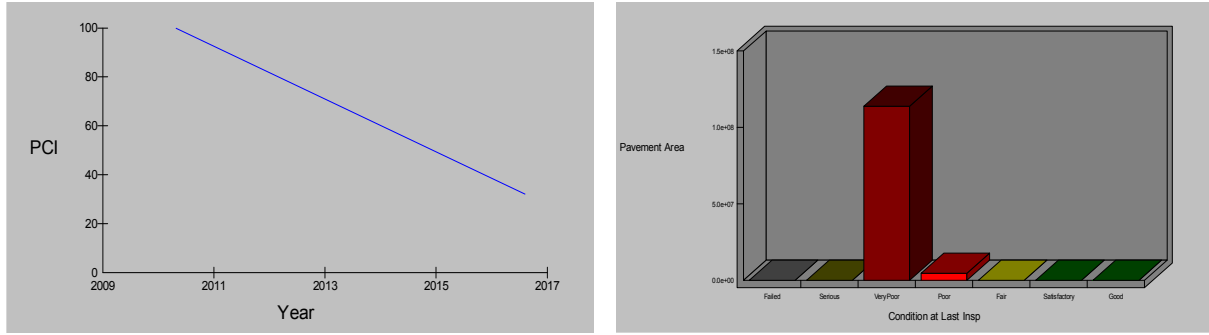
#### ۴- نتایج و تجزیه و تحلیل PCI وضعیت موجود



شکل ۳. الف. مقدار pci برای آزاد راه کربلا قطعه کیلومتر ۳۶-۳۷



شکل ۳. ب. مقدار pci برای آزاد راه پل زال قطعه کیلومتر ۱۰۳-۱۰۴



شکل ۳. ج. مقدار pci برای آزادراه تهران-قم قطعه کیلومتر ۳۸-۳۹

### مدل رگرسیون چندگانه

باشند، مدل برازش داده شده مدل بهتری است و تغییرات متغیر پاسخ را بهتر تبیین می‌کند. ضمن اینکه مقدار  $R^2$  تعدیل شده نسبت به  $R^2$  قویتر است. چنانچه ملاحظه می‌شود هر دو مقدار مذکور، کوچک و از یک فاصله دارند. بنابراین به نظر می‌رسد مدل رگرسیون خطی چندگانه مدل مناسبی نیست و نیاز به مدل‌سازی قوی‌تری دارد.

به منظور محاسبه PCI با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه با داده‌های متغیر در طول عمر روسازی و مقایسه قدرت تخمین آن، با متغیر پاسخ PCI برازش داده شد. متغیرهای مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. جدول ۳ دو معیار برازندگی مدل  $R^2$  و  $R^2$  تعدیل شدهی مدل برازش داده شده را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات این دو معیار از صفر تا ۱ است به طوری که هر چه به ۱ نزدیک‌تر

جدول ۲. متغیرهای مدل

متغیرها	عنوان
$X_1$	طول عمر قطعه در زمان بازرسی (ماه)
$X_2$	عرض واحد نمونه
$X_3$	متوسط AADT در طول عمر قطعه
$X_4$	متوسط درصد وسایل نقلیه سنگین در طول عمر قطعه
$X_5$	بیشینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶
$X_6$	کمینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶
$X_7$	ضخامت روسازی (cm)

جدول ۳. دو معیار برازندگی مدل  $R^2$  و  $R^2$  تعدیل شدهی مدل رگرسیون خطی چندگانه

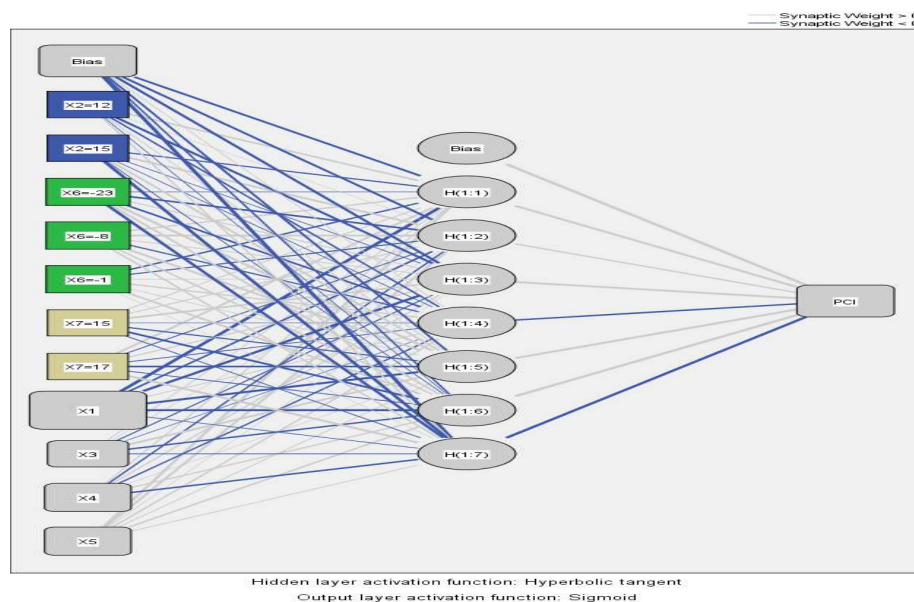
Adjusted R Square	$R^2$	$R^2$ تعدیل شده
.116	.139	.373



### مدل شبکه عصبی انتشار برگشتی (BPNN)

حدود ۱ و ۰,۲۲ است. در جدول ۵ اهمیت هر یک از متغیرها در تعیین مدل شبکه عصبی نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد طول عمر قطعه بیشترین اهمیت (۰,۵۵) را در ساختن شبکه عصبی داشته است و پس از آن بیشینه دما (۰,۱۲۲) و درصد وسایل نقلیه سنگین (۰,۱۲۰) متغیرهای مهم بعدی هستند. جدول ۶ مقادیر خطا و R2 برای داده‌های آموزش دیده و تست شده را نشان می‌دهد که میزان R2 بالای مدل BNPP نشان از اعتبار زیاد مدل در تعیین میزان شاخص وضعیت روسازی می‌باشد که این مقادیر R2 به ترتیب برای Training, Testing و Validation برابر ۰,۸۶۵, ۰,۸۷۶ و ۰,۸۷۶ می‌باشد.

به منظور محاسبه PCI با استفاده از شبکه عصبی انتشار برگشتی با داده‌های متغیر در طول عمر روسازی و مقایسه قدرت تخمین آن، با متغیر پاسخ PCI برازش داده شد. برای ساخت مدل شبکه عصبی انتشار برگشتی با استفاده از متغیرهای جدول ۲ حدود ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش شبکه استفاده شده و ۳۰ درصد باقیمانده نیز برای آزمون شبکه به کار گرفته شده است. در شکل ۴ تصویر شبکه عصبی برازش داده شده بر روی داده‌ها نشان داده شده است. شبکه دارای یک لایه پنهان است و تعداد ۷ نرون در لایه پنهان وجود دارد. مجموع مربعات خطا و خطای نسبی برای داده‌های آموزشی (۷۰٪ داده‌ها) به ترتیب حدود ۲ و ۰,۲۶ است. این مقادیر خطا برای داده‌های آزمون (۳۰٪) به ترتیب برابر



شکل ۴. شبکه عصبی برازش داده شده بر روی داده‌ها

جدول ۴. مجموع مربعات خطا و خطای نسبی برای داده‌های آموزشی و آزمون

#### Model Summary

Training	Sum of Squares Error	2.256
	Relative Error	.262
	Stopping Rule Used	1 consecutive step(s) with no decrease in error <sup>a</sup>
	Training Time	0:00:00.03
Testing	Sum of Squares Error	1.004
	Relative Error	.225

Dependent Variable: PCI واحد نمونه در سال 96

a. Error computations are based on the testing sample.

جدول ۵. اهمیت هر یک از متغیرها در تعیین مدل شبکه عصبی

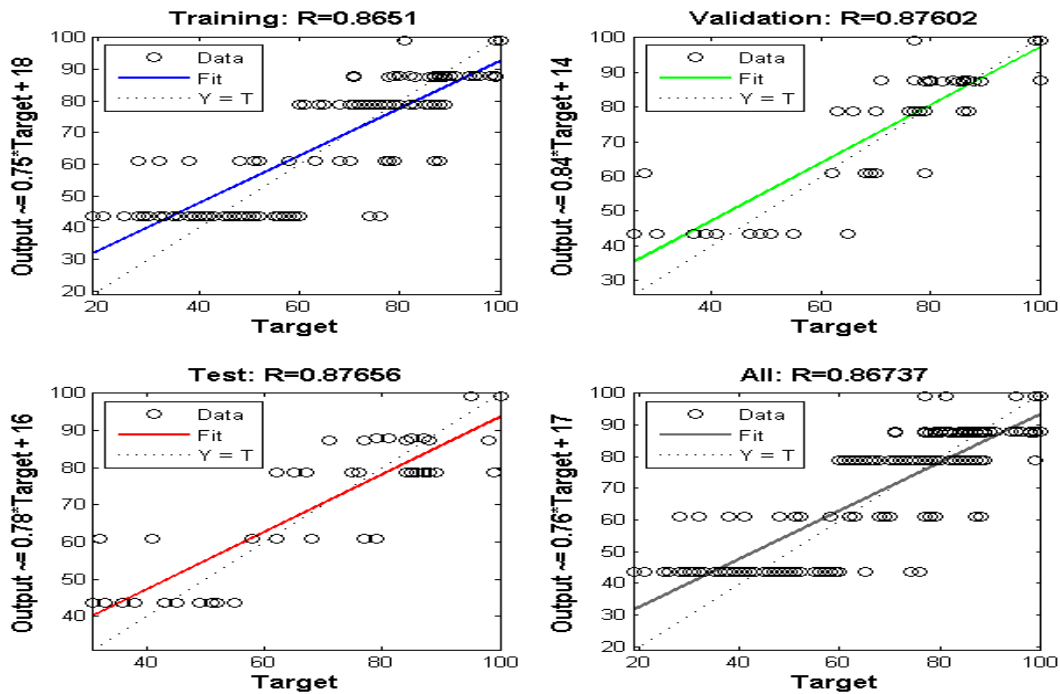
متغیرها	Importance	Normalized Importance
عرض واحد نمونه	.044	8.0%
کمینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶	.082	14.8%
ضخامت روسازی (سانتی متر)	.036	6.6%
طول عمر قطعه در زمان بازرسی (ماه)	.556	100.0%
متوسط AADT در طول عمر قطعه	.039	7.0%
متوسط درصد وسایل نقلیه سنگین در طول عمر قطعه	.120	21.6%
بیشینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶	.122	21.9%

جدول ۶. میزان عملکرد مدل بر اساس BPNN

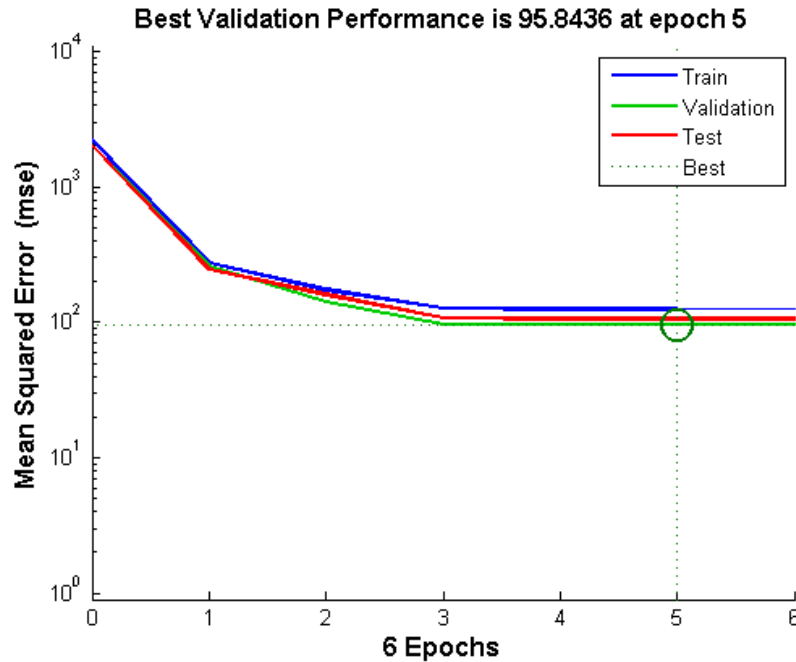
R <sup>2</sup>	MSE	Process
۰.۸۶۵	۱۲۵,۳۹۸۶	Training
۰.۸۷۶	۱۰۶,۵۰۲۶	Testing
۰.۸۷۶	۹۵,۸۴۳۶	Validation

و تحلیل دقیق مدل BPNN انجام شد که می‌تواند انطباق مقدار PCI تخمین زده شده را نشان دهد که بهترین عملکرد اعتبارسنجی مقدار ۵ می‌باشد که نشان دهنده کاهش میزان خطا نسبت به آموزش اولیه شبکه می‌باشد (شکل ۶).

در نهایت در شکل ۵ نمودار پراکنش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی نشان داده شده است که نشان‌دهنده تطبیق بالای مدل شبکه عصبی در پیش‌بینی وضعیت روسازی می‌باشد. علاوه بر آن تجزیه



شکل ۵. نمودار پراکنش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی



شکل ۶. نمودار بررسی عملکرد آموزش شبکه و میزان خطا در طول برازش مدل

#### ۴-۴- مقایسه عملکرد مدل‌ها

هرچه مقدار بیشتر و نزدیک به ۱ داشته باشد بهتر است) بررسی شده است که جدول ۷ نشان می‌دهد که مدل BPNN در مقایسه با مدل رگرسیون خطی، مدل مناسب‌تری جهت محاسبه شاخص وضعیت روسازی (PCI) می‌باشد.

میزان عملکرد مدل بر اساس شاخص میانگین مربعات خطا (توان دوم مجموع اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حقیقی را در نظر می‌گیرد و هرچه مقدار کمتری داشته باشد بهتر است) و همچنین شاخص  $R^2$  (همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده را اندازه می‌گیرد و

جدول ۷. مقایسه مدل

Statistical parameters	BPNN	multiple regression model
$R^2$	۰,۸۷۶	۰,۱۳۹
MSE	۹۵,۸۴۳۶	۱۸۹,۴۵

#### ۵- نتیجه‌گیری

متغیرهای طول عمر قطعه در زمان بازرسی (ماه)، عرض واحد نمونه، متوسط AADT در طول عمر قطعه، متوسط درصد وسایل نقلیه سنگین در طول عمر قطعه، بیشینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶، کمینه دما در طول عمر قطعه در سال ۱۳۹۶ و ضخامت روسازی (سانتی‌متر) برازش داده شده و قدرت تخمین آنها در محاسبه شاخص وضعیت

در این تحقیق دو مدل رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی انتشار برگشتی به منظور سنجش تخمین شاخص وضعیت روسازی (PCI) برازش داده شد. برای این منظور پس از برداشت خرابی راه برای سه آزادراه کربلا، پل زال و تهران-قم و محاسبه شاخص وضعیت روسازی آنها با استفاده از نرم افزار MicroPaver دو مدل نامبرده با استفاده از

## 11- Back Propagation Neural Network

### ۸-مراجع

- Beck, H. Van Sickle, E., (2010), "Final Report, Current Practices in Pavement Performance Modeling, PROJ ECT 08-C07), Pennsylvania Department of Transportation, Report No. FHWA-PA-2010-007-080307.

- Nazzal, M. Md. Iqbal, Tanvir S. Kim, Abbas, A. Akentuna, M. Quasem, T., (2016), "Evaluation of the long-term performance and life cycle costs of GTR asphalt pavements, Journal of Construction and Building Materials 114, pp. 261-268.

-A. Alavi, H. Hasni, N. Lajnef, K. Chatti, (2016), "Continuous health monitoring of pavement systems using smart sensing technology, Journal of Construction and Building Materials 114 pp.719-736.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.12>.

- Chan, A. Keoleian, G. Gabler, E., (2008), "Evaluation of lifecycle cost analysis practices used by the Michigan Department of Transportation", Journal of Transportation Engineering, 134(6): pp.236-245.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2008\)134:6\(236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:6(236)).

-Alrashyadah, E. Abo-Qudais, S., (2018), "Modeling of creep compliance behavior in asphalt mixes using multiple regression and artificial neural networks, Journal of Construction and Building Materials 159 pp.635-641,  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.132>.

-Arambula,-E. George, R. Xiong, Hall, W. G., (2011), "Development and Validation of Pavement Performance Models for the State of Maryland", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2225(1): pp.25-31.

-Corazza, M. P.D. Mascio, Moretti, L., (2016), "Managing sidewalk pavement maintenance: A case study to increase pedestrian safety", Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition, Vol. 3, Issue 3, pp. 203-214,  
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.04.001>.

-Deshmukh, M., (2010), "Development of equations to determine the increase in pavement condition due to treatment and the rate of decrease in condition after treatment for a local agency pavement network: Texas A&M

روسازی بررسی گردید. بر اساس نتایج به دست آمده میزان عملکرد مدل شبکه عصبی بر اساس شاخص میانگین مربعات خطا و همچنین شاخص  $R^2$  که به ترتیب برابر است با ۰,۹۵ و ۰,۸۷ می باشد که در مقایسه با مدل رگرسیون خطی چندگانه (۰,۱۳۹) دارای اعتبارسنجی بیشتری جهت پیش بینی شاخص وضعیت روسازی می باشد. علاوه بر آن با توجه به مدل شبکه عصبی می توان دریافت طول عمر قطعه بیشترین اهمیت را در ساخت شبکه عصبی داشته و پس از آن بیشینه دما و درصد وسایل نقلیه سنگین متغیرهای مهم بعدی در پیش بینی وضعیت روسازی راه ها می باشد. از این رو با آگاهی از چگونگی وضعیت آینده روسازی ها راه ها و داشتن برنامه ای مناسب می توان به شناسایی اینکه، در هر دوره زمانی برای هر بخش از راه، چه نوع عملیات تعمیر و نگهداری همراه با چه میزان بودجه باید اختصاص داده شود، پرداخته که از مهمترین نیازهای مدیران و تصمیم گیران ادارات کل راه و شهرسازی استان ها جهت اتخاذ تصمیمات مختلف در سطح پروژه تعمیر و نگهداری راه، اولاً توجه پذیر از لحاظ مالی و ثانیاً همگون، در راستای بهبودی روند تخصیص منابع محدود تعمیر و نگهداری روسازی و ارتقای کارایی این هزینه ها در حوزه مدیریت روسازی می باشد.

### ۶-سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از سازمان راهداری و مرکز تحقیقات وزارت راه، مسکن و شهرسازی که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

### ۷-پی نوشت ها

- 1- Pavement Management System
- 2- Pavement Condition Index
- 3- Pavement Serviceability Index
- 4- Pavement Quality Index
- 5-Long-Term Pavement Performance
- 6- Life-Cycle Cost Analysis
- 7- International Roughness Index
- 8- Sidewalk Condition Index
- 9- Artificial Neural Network
- 10- Federal Aviation Administration

- Ognjenovic, A. Ishkov, D. Cvetkovic, D. Peric, Romanovich, M., (2016), "Analyses of Costs and Benefits in the Pavement Management Systems, *Procedia Engineering* V165, pp.954 – 959, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.805>.
- Premkumar, L. and Varvik, W.R., (2016), "Enhancing pavement performance prediction models for the Illinois Tollway System", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 1, Issue 9, pp.14-16.
- Robinson, R., Danielson, U. and Snaith, M., (1998), "Road maintenance management", Macmillan Pub., UK.
- Salem, O. Abourizk, S. Ariaratnam, S., (2003), "Risk-based life-cycle costing of infrastructure rehabilitation and construction alternatives. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(1), pp.6–15. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:1(6).
- Setyawan, A., Nainggolan, J. and Budiarto, A., (2015), "Predicting the remaining service life of road using pavement condition index", *Procedia Engineering*, Vol.125, pp. 417 – 423.
- Shahin, MY, (2005), "Pavement Management for Airports Roads and Parking Lots". New York: Springer Science and Business Media; DOI 10.1007/b101538.
- Sherwani, S. FAA Pavement User Guide, U.S. (2011-2015), "Department of Transportation Federal Aviation Administration. <http://faapaveair.faa.gov>.
- Sollazo, G., Fwa, T. F. and Bosurgi, G., (2017), "An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements", *Construction and Building Materials*, Vol. 134, pp. 684 – 693.
- University;  
<https://books.google.com/books?id=nniWAQAACAAJ>.
- G. Sollazzo, T.F. Fwa, Bosurgi, G., (2017), "An ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements, *Journal of Construction and Building Materials* 134 pp.684693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.186>.
- H. Zhang, G.A. Keoleian, M.D. Lepech, (2012), "Network-Level Pavement Asset Management System Integrated with Life-Cycle Analysis and Life-Cycle Optimization. *Journal of Infrastructure Systems*, 19(1): pp.99–107, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000093).
- Haas, R., Hudson, W.R. and Zaniewski, J., (1994), "Modern pavement management", Krieger Pub. Co., USA.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.096>.
- <https://doi.org/10.3141/2225-04>.
- Karasahin, M., Terzi, S., (2016), "Performance model for asphalt concrete pavement based on the fuzzy logic approach", *Transport*, Vol. 29:1, pp. 18–27.
- M.S.R. Amin, L.E. Amador, (2014), "The Multi-criteria based Pavement Management System for Regional Road Network of Atlantic Provinces of Canada. *International Journal of Pavements*, 13, pp.1-2-3. <https://www.researchgate.net/publication/273202230>.
- M.S.R. Amin, L.E. Amador, (2016), "Pavement management with dynamic traffic and artificial neural network: a case study of Montreal, *Canadian Journal of Civil Engineering*", 43(3): pp.241-251, <https://doi.org/10.1139/cjee-2015-0299>.

# Modeling the Pavement Condition Index (PCI) of Pavement by Multiple Linear Regression and Neural Network Back Propagation

*Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.*

*Mohammad Reza Ahadi, Associate Professor, Transportation Research Institute, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

*Abbasali Tayefi Nasrabadi, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.*

*Email: m.ahadi@bhrc.ac.ir*

Received: November 2019-Accepted: February 2020

## ABSTRACT

One of the most important goals of a pavement management system is determination of optimal priorities and time for repairs, through prediction of pavement status. In fact, the purpose of the PMS system is to repair and maintain the early stages of cost savings and savings. . Therefore, in this study, in order to determine the Pavement Condition Index (PCI), two linear regression models and back propagation neural network models were fitted and their power estimates were compared. In this regard, the damages of three freeways of Karbala, Paul Zal and Tehran - Qom have been studied to identify the appropriate method for predicting pavement status index in order to identify the optimal maintenance time to reduce its costs. . Micropaver software and MATLAB and SPSS software were used for modeling and evaluation of components. This track was sampled in order to capture the failure of sample units at 100 m intervals and parts at 500 m intervals. The variables considered in the model analysis included: segment lifetime at inspection time (month), unit width, average AADT at segment lifetime, average percentage of heavy vehicles at segment lifetime, maximum temperature at segment lifetime in 1396, minimum Temperature is the lifetime of the piece in 1396 and the thickness of the pavement (cm). . The results show that the performance of neural network model based on mean square error index (MSE) as well as R2 index is 0.95 and 0.87, respectively, which is more valid than the multiple linear regression model (0.139). The future is paved. In addition, according to the neural network model, the lifetime of the segment can be most important in neural network construction (0.55) and then maximum temperature (0.122) and percentage of heavy vehicles (0.120) are the next important variables in predicting pavement status of roads.

**Keywords:** Pavement Condition Index, prediction, Neural Network, Damage