

# پیش‌بینی عملکرد روسازی با تلفیق مدل خانواده و شبکه عصبی

## (مطالعه موردی: معابر شهر ساری)

حسین قاسم زاده طهرانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

میلاذ جعفرنژاد، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

E-mail: h\_ghasemzadeh@shahroodut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹

دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸

### چکیده

مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی مهم‌ترین بخش از یک سیستم مدیریت روسازی است. اثر بخشی برنامه‌های بلندمدت و میان مدت تعمیرات و نگهداری راه، وابسته به صحت و اعتبار مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی است. در مدل‌های خانواده، قطعات مختلف که مشخصات فنی مشابه داشته و روند افت کیفیت آنها یکسان باشد، در یک گروه قرار گرفته و برای مجموعه قطعات روسازی هر خانواده، یک مدل پیش‌بینی ساخته می‌شود. مدلسازی بر اساس خانواده روسازی با کمترین داده‌ها و با سریعترین و ارزانه‌ترین روش می‌تواند نتایجی با دقت بسیار خوب بدست دهد.

در این تحقیق در خیابانهای شهر ساری دو خانواده مختلف روسازی تعریف شده است که عبارتند از خانواده یک روسازی شامل معابر با ترافیک سنگین و ضخامت زیاد آسفالت و خانواده دو روسازی شامل معابر با ترافیک سبک و ضخامت کم آسفالت. کلیه خیابانهای اصلی شهر مورد ارزیابی قرار گرفته و شاخص کیفیت روسازی (PCI) و عمر روسازی تعیین شده است. در هر خانواده روسازی با روش رگرسیون مدلسازی انجام شده است که نهایتاً یک مدل رگرسیون درجه سه با ضریب همبستگی ۹۰٪ برای خانواده یک روسازی و ضریب ۸۴٪ برای خانواده دو روسازی بدست آمد. همچنین در هر خانواده روسازی، با استفاده از شبکه عصبی و با روش پرسپترون چند لایه (MLP) پیش‌بینی عملکرد روسازی انجام گرفت که ضریب همبستگی ۹۳٪ را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مدلسازی فقط با یک بار ارزیابی روسازی انجام شده است، دقت مدلها بسیار خوب ارزیابی می‌شود که ناشی از استفاده از روش خانواده روسازی است. در نهایت تلفیق مدل خانواده با شبکه عصبی نسبت به روش رگرسیون به نتایج بهتری منجر شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی، مدل خانواده روسازی، مدل رگرسیون، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه.

## ۱. مقدمه

مدل پیش بینی عملکرد روسازی مهم ترین بخش از یک سیستم مدیریت روسازی بشمار می رود. تمام برنامه های بلندمدت و میان مدت تعمیرات راه بر مبنای پیش بینی هایی است که از وضعیت آینده روسازی صورت می گیرد. بنابراین اثر بخشی این برنامه ها وابسته به صحت و اعتبار مدل پیش بینی عملکرد روسازی است. برای این منظور روشهای بسیار متنوعی تا کنون پیشنهاد شده اند و در پروژه های اجرایی نیز بکار رفته اند. 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 پیش بینی نمود. بنابراین در سالهای اولیه راه اندازی یک سیستم مدیریت روسازی، دقت برنامه ها 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 مدل های خانواده، چندین روسازی که از لحاظ شرایط فنی مشابه یکدیگرند و از لحاظ روند افت کیفیت از یک الگو تبعیت می کنند، در یک گروه قرار گرفته و مدل پیش بینی عملکرد برای مجموعه آنها ساخته می شود. 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 می توانند مشخص نمایند. هر چه روسازیهای یک خانواده عمر بهره برداری وسیع تری را پوشش دهند، مدلسازی دقت بیشتری خواهد داشت. در این مقاله برای مدلسازی عملکرد روسازی در خیابانهای اصلی شهر ساری از مدل خانواده استفاده شده است. در هر خانواده هم روش رگرسیون و هم شبکه عصبی برای مدلسازی بکار رفته است.

## ۲. پیشینه تحقیق

مدل پیش بینی عملکرد روسازی باید چگونگی افت کیفیت روسازی را در طول زمان بهره برداری تشریح نماید. افت کیفیت روسازی (یا رشد و گسترش خرابیها) هم به دلیل ترافیک و هم به دلیل عوامل اقلیمی اتفاق می افتد. بنابراین مدل باید بتواند خرابیهای راه 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 گسترده ای را شامل می شود. از شاخصهای ترکیبی مانند شاخص وضعیت روسازی (PCI)، شاخص خدمت دهی فعلی روسازی (PSI) و شاخص کیفیت راه (PQI) گرفته تا فقط یک خرابی یا یک خصوصیت مانند ناهمواری، ترک خوردگی، شیار افتادگی و غیره می توانند نشان دهنده وضعیت راه باشند [Robinson, Danielson and Snaith, 1998].

از جمله رایج ترین مدل های پیش بینی عملکرد روسازی، مدل مارکوف است که در نرم افزار MicroPaver استفاده شده است. این مدل جزو مدل های احتمالی طبقه بندی می شود و بر اساس ایده خانواده روسازی شکل گرفته است. در مدل مارکوف یک ماتریس احتمال انتقال وضعیت روسازی بر اساس ارزیابی های قبلی تهیه شده و احتمال وقوع یک وضعیت خاص در آینده پیش بینی می شود. این مدل بر اساس جمع آوری اطلاعات انواع روسازی ها طی بیش از سی سال تهیه شده است و یکی از پرکاربردترین مدلها در دنیا است. بیش از ۸۰٪ فرودگاههایی که سیستم مدیریت روسازی دارند از MicroPaver استفاده می کنند [Paver-7.0 User Guide, 2014].

ماتریس انتقال در این مدل شامل دو بردار است. بردار  $P_i$  احتمال باقی ماندن 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 حالت های وضعیت را مشخص می کند. اگر ماتریس انتقال با  $T$  مشخص شود، آنگاه وضعیت روسازی در چرخه  $n$ ام به صورت  $X_n=Q_0.T^n$  محاسبه می شود. مقادیر احتمالات  $p_i$  و  $q_i$  به گونه ای محاسبه می شوند که مقادیر پیش بینی 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.

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

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

که در آن:

## پیش‌بینی عملکرد روسازی با تلفیق مدل خانواده و شبکه عصبی.....

که در آن :  
**dACA** - افزایش درصد مساحت ترک خوردگی راه در هر سال  
**CRP** - زمان به تعویق افتادن ترک به دلیل تعمیرات پیشگیرانه (سال)  
**CDS** - شاخص کیفیت ساخت روسازی آسفالتی  
**Z<sub>A</sub>** - متغیر دامی  
**SCA** - متغیر وابسته به ترک خوردگی در ابتدای سال آنالیز  
**a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>** - ضرایب وابسته به نوع روسازی و شرایط ترک خوردگی  
**K<sub>cpa</sub>** - ضریب کالیبراسیون برای گسترش ترک سازه ای

معمولاً این گونه مدلها بر پایه تحلیل‌های مکانیستیک ساخته می‌شوند و از دقت خوبی برخوردارند، اما نقطه ضعف آنها از دیدگاه کاربردی این است که برای راه اندازی یک سیستم مدیریت روسازی به حجم بسیار زیادی از داده‌ها نیاز است و این به معنی صرف زمان و هزینه بیشتر است.

در عین حال تحقیق درباره ایده‌های جدید مدل‌سازی نیز ادامه دارد. از جمله فعالیت‌های اخیر به مقاله Shah و همکاران می‌توان اشاره کرد. در این تحقیق تعدادی شاخص به نام شاخص وضعیت خرابیها (PCI<sub>Distress</sub>)، شاخص وضعیت ناهمواری (PCI<sub>Roughness</sub>)، شاخص وضعیت اصطکاک (PCI<sub>Skid</sub>) و شاخص وضعیت سازه‌ای (PCI<sub>structure</sub>)، برای روسازی راه پیشنهاد شده است. سپس یک شاخص وضعیت کلی که برآیند چهار شاخص قبلی است (OPCI) معرفی شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داده که استفاده از این شاخص وضعیت کلی می‌تواند به نتایج بهتری منجر شود. [Shah et al. 2013]

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

n - تعداد چرخه های خدمت روسازی  
**Y<sub>(n,j)</sub>** - مقدار مشاهده شده PCI روسازی در چرخه خدمت n  
**X<sub>(n,j)</sub>** - مقدار پیش بینی شده PCI روسازی در چرخه خدمت n

از طرف دیگر در نرم افزار HDM-4 وضعیت روسازی با مدل‌سازی هر یک از خرابیها به صورت جداگانه بررسی شده است. برای هر خرابی یک مدل اولیه، زمان شروع خرابی را تخمین می‌زند و مدل دوم نحوه رشد و گسترش خرابی را نشان می‌دهد. در مورد روسازی آسفالتی، این نرم افزار از مدل‌های افزایشی استفاده می‌کند. بدین معنی که روند رشد خرابیها به صورت سال به سال محاسبه شده و مرتباً افزایش می‌یابد. در این نرم افزار خرابیهایی که برای روسازی آسفالتی مدل شده‌اند عبارتند از ترک خوردگی، عریان شدگی، چاله، جدا شدن لبه ها، شیار، زبری سطحی، مقاومت اصطکاک و ناهمواری. به عنوان مثال زمان شروع ترکهای سازه‌ای در یک روسازی آسفالتی بدون روکش و مرمت با اساس سنگدانه‌ای از رابطه (۲) قابل محاسبه است [HDM-4 User Manual,2000].

$$ICA = K_{cia} \left\{ CDS^2 a_0 \exp \left[ a_1 SNP + a_2 \left( \frac{YE4}{SNP^2} \right) \right] + CRT \right\} \quad (2)$$

که در آن:

**ICA** - زمان شروع ترک سازه ای (سال)  
**CDS** - شاخص کیفیت ساخت روسازی آسفالتی  
**SNP** - میانگین سالیانه عدد سازه ای روسازی  
**YE4** - تعداد سالیانه بار هم ارز محور استاندارد  
**CRT** - زمان به تعویق افتادن ترک به دلیل تعمیرات (سال)

**a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>** - ضرایب وابسته به نوع روسازی و شرایط ترک خوردگی

**K<sub>cia</sub>** - ضریب کالیبراسیون برای ایجاد ترک سازه ای

فرم عمومی مدل گسترش ترکهای سازه‌ای نیز از رابطه (۳) تبعیت می‌کند [HDM-4 User Manual,2000].

$$dACA = K_{cpa} \left[ \frac{CRP}{CDS} \right] Z_A \left[ Z_A a_0 a_1 \delta t_A + SCA^{a_1} \right]^{1/a_1} - SCA \quad (3)$$

معمولاً گسترده‌تری حجم داده‌ها باعث پراکندگی آنها شده و خطای زیادی را به مدل تحمیل می‌کند. در چنین شرایطی، برای کاهش خطا، می‌توان اقدام به تفکیک داده‌ها و طبقه بندی آنها در زیر مجموعه‌های مختلف نمود. هر یک از زیر مجموعه‌ها نشان دهنده یک گروه از قطعات روسازی با خصوصیات فنی مشابه است که خانواده روسازی نامیده می‌شود. بنابراین یک خانواده روسازی نشان دهنده گروهی از قطعات روسازی است که روند رشد و توسعه خرابیها در آنها یکسان باشد. استفاده از مدل خانواده دو مزیت مهم دارد. اول اینکه با این روش یک مدل پیچیده شکسته شده و به چند مدل ساده تبدیل می‌شود که کار مدلسازی را بسیار آسان می‌کند. دومین مزیت مدل خانواده این است که پیش‌بینی عملکرد روسازی در یک قطعه با کمک اطلاعات دیگر قطعات خانواده انجام می‌گیرد و خطاهای پیش‌بینی به شدت کاهش می‌یابد. در واقع مدل پیش‌بینی عملکرد روسازی در یک خانواده نشان‌دهنده رفتار میانگین کلیه قطعات روسازی‌های متعلق به آن خانواده است [Shahin, 2002]. از دیگر نقاط قوت روش خانواده این است که با هر مرحله ارزیابی روسازی و ورود اطلاعات جدید به بانک اطلاعاتی خانواده، این بانک اطلاعاتی کاملتر شده و می‌توان مدل پیش‌بینی عملکرد را به طور مداوم و مستمر بهنگام نمود [Butt, 1992].

#### ۴. جمع آوری داده‌ها در معابر شهر "ساری"

در این تحقیق از معابر اصلی شهر ساری به عنوان یک مطالعه موردی برای تهیه بانک اطلاعاتی استفاده شده است. هر خیابان به عنوان یک قطعه تعریف شده است و به ازای هر ۵۰۰ متر از طول قطعه یک واحد نمونه به طول ۱۰۰ متر (۲۰٪ از طول کل شبکه) مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین خطوط عبور مختلف در هر خیابان به طور جداگانه ارزیابی شده‌اند. در مجموع ۳۲ خیابان شامل ۱۲۵ واحد نمونه برای تهیه بانک اطلاعاتی استفاده شده‌اند. در این قطعات وضعیت روسازیها بر اساس شاخص کیفیت روسازی (PCI) اندازه‌گیری شده و عمر روسازی به صورت فاصله زمانی از هنگام آخرین روکش و یا آخرین زمان احداث روسازی تا هنگام ارزیابی روسازی تعیین شده است.

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 (PSI) 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 Setyawan و همکاران رابطه بین شاخص وضعیت روسازی (PCI) 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 Premkumar و Vavrik از مدل‌های پیش‌بینی 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 پیش‌بینی 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 پیش‌بینی عملکرد سازه‌ای روسازی استفاده شده است. در این مقاله ابتدا ارتباط بین مشخصات سازه‌ای راه با ناهمواری سطح آن بررسی شده و سپس با اندازه‌گیری ناهمواری شبکه راهها اقدام به پیش‌بینی مشخصات سازه روسازی نموده است. بدین ترتیب با افزایش عمر بهره‌برداری از راه و افزایش ناهمواریهای آن، روند افت کیفیت سازه‌ای روسازی نیز برآورد می‌شود. در این مقاله از داده‌های LTPP 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 هستند [Sollazo et al. 2017].

#### ۳. مدل خانواده روسازی

مدلسازی بر مبنای مفهوم خانواده روسازی، روشی هوشمندانه برای رسیدن به حداکثر دقت و دستیابی به بهترین نتیجه با ساده‌ترین روش و صرف کمترین اطلاعات و هزینه است.

شده‌اند در خانواده مربوط به ترافیک سبک قرار می‌گیرند. ولی خطوط کندرو که محل عبور وسایل سنگین است در خانواده مربوط به ترافیک سنگین قرار دارند. بنابراین مبنای تعریف خانواده همان تفکیک ترافیک به دو گروه سبک و سنگین است. نحوه برداشت خرابیها مطابق دستور العمل نرم افزار MicroPaver بوده و محاسبه PCI نیز توسط این نرم افزار انجام شده است. جهت آشنایی با فرم داده‌های جمع آوری شده، نمونه‌ای از خلاصه نتایج مربوط به چهار قطعه روسازی در جدول (۱) درج شده است.

## ۵. مدل رگرسیون برای هر خانواده

### روسازی

قبل از مدلسازی ابتدا لازم است نرمال بودن داده‌ها کنترل شود. برای این منظور ضریب چولگی و ضریب کشیدگی داده‌ها باید در بازه  $-2$  تا  $+2$  بوده و مقدار P-value در آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (KS) بزرگتر از  $0.05$  باشد. در شکل (۱) نمودار جعبه‌ای مربوط به هر دو خانواده روسازی ملاحظه می‌شود. در مورد خانواده روسازی با ترافیک سنگین داده شماره ۹ خارج از محدوده است که بعد از حذف آن ضرایب فوق‌الذکر محاسبه می‌شود. این ضرایب در جدول (۲) درج شده است و نرمال بودن داده‌ها را نشان می‌دهد.

در این معابر تقریباً همه قطعات از لحاظ مشخصات زیرسازی شرایط یکسانی دارند، اما از لحاظ ضخامت رویه متفاوت هستند که این ضخامت تحت تاثیر ترافیک بوده است. بنابراین حجم تردد ترافیک در معابر به عنوان معیاری برای تفکیک قطعات به دو خانواده مختلف انتخاب شده است که عبارتند از خانواده یک روسازی شامل قطعات با ترافیک سنگین و خانواده دو روسازی شامل قطعات با ترافیک سبک. در مورد ارتباط بین ضخامت روسازی و ترافیک نیز لازم به ذکر است که در خصوص جزئیات اجرای روسازی در خیابانهای شهر، مشخص شد که در خیابانهایی که وسایل سنگین مجاز به تردد نیستند و ترافیک آنها سبک ارزیابی شده است از یک طرح روسازی تپ و یکسان استفاده شده است. همچنین در معابری که تردد وسایل سنگین مجاز بوده است از روسازی با ضخامت بیشتر استفاده شده است بطوریکه ضخامت اساس و زیراساس در آنها یکسان بوده و فقط در ضخامت آسفالت کمی تغییر وجود دارد. به این ترتیب با تعریفی که از خانواده روسازی در این تحقیق انجام شد، یعنی تفکیک خانواده‌ها بر اساس ترافیک سبک و سنگین، خود بخود تفاوت طرح روسازی هم در دو خانواده لحاظ می‌شود.

همچنین در خصوص خیابانهایی که چند خط عبور دارند، به دلیل اینکه تردد خودروهای سنگین از خط تندرو انجام نمی‌شود، طبیعتاً قطعاتی از روسازی که در خط تندرو واقع

جدول ۱. مشخصات قطعات (کیفیت روسازی، ترافیک، عمر روسازی)

شماره قطعه	جهت	خط عبور	PCI	ترافیک	عمر روسازی (سال)
۱	رفت	کندرو	۹۵	سنگین	۲
		وسط	۹۶	سنگین	۲
		تندرو	۹۶	سبک	۲
	برگشت	کندرو	۱۰۰	سنگین	۲
		وسط	۹۳	سنگین	۲
		تندرو	۹۵	سبک	۲
۲	رفت	یک خط عبور	۶۵	سنگین	۱۶
۳	رفت	یک خط عبور	۳۵	سنگین	۲۱
۴	رفت	یک خط عبور	۵۸	سنگین	۱۸

جدول ۲. بررسی نرمال بودن داده‌ها

P-value	کشیدگی	چولگی	انحراف معیار	میانگین	تعداد داده‌ها	خانواده روسازی
۰,۱۶۴	۰,۰۹۵	- ۰,۸۵۴	۱۵,۸۷	۸۰,۵۶	۶۰	یک (ترافیک سنگین)
۰,۹۹۳	۰,۳۹۷	- ۰,۰۳۴	۴۱,۶۱	۷۲,۷۶	۴۳	دو (ترافیک سبک)

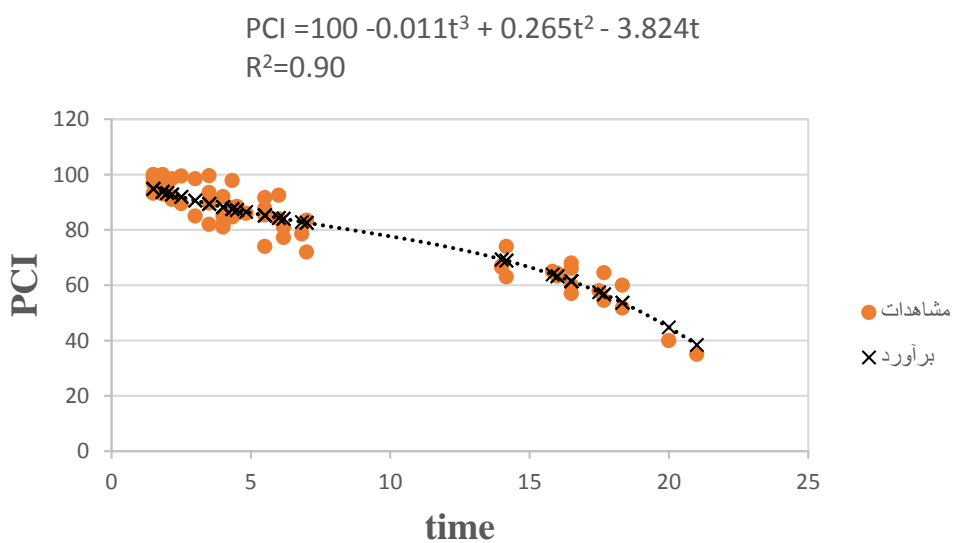
در ادامه کار، برای یافتن رابطه بین کیفیت روسازی (PCI) و عمر روسازی (N) از فرمهای مختلف رگرسیون استفاده شد که بهترین نتایج در جدول (۳) بطور خلاصه مشاهده می‌شود. با توجه به جدول (۳) در هر دو خانواده، مدل درجه چهار بیشترین ضریب همبستگی را نشان می‌دهد. اما از لحاظ تئوری این مدل دو نقطه عطف دارد و بنابراین ممکن است در بخشی از آن شرط غیر مثبت بودن شیب منحنی عملکرد نقض شود. این شرط موجب می‌شود که کیفیت روسازی در طول زمان بهره برداری افزایش نیابد. بنابراین برای هر دو خانواده روسازی از منحنی درجه سوم استفاده می‌شود. در این صورت هم ضریب همبستگی بالایی دارد و هم شیب منحنی همیشه غیر مثبت خواهد ماند. در شکل (۱) مدل رگرسیون درجه سه برای خانواده یک روسازی با ضریب همبستگی ۰,۸ در مقایسه با داده‌های موجود ملاحظه می‌شود.

ضریب همبستگی پیرسون بین دو پارامتر کیفیت روسازی (PCI) و عمر روسازی (N) برای خانواده ترافیک سبک ۰,۸۵۱- و برای خانواده ترافیک سنگین ۰,۹۳۹- بدست آمده است که نشان دهنده رابطه خوب و معنی‌دار بین این دو پارامتر به صورت معکوس است. موضوع دیگری که باید بررسی شود این است که داده‌های مندرج در دو خانواده روسازی اختلاف معنی‌داری داشته باشند تا بتوان آنها را در دو گروه متفاوت قرار داد. برای کنترل معنی‌داری اختلاف بین دو گروه داده‌ها، آزمون t انجام شده است. در این آزمون آماره t برابر ۲,۵۳ و مقدار P-value حاصل از آن ۰,۰۱۳ بدست می‌آید و چون بزرگتر از ۰,۰۵ است بنابراین اختلاف معنی‌دار بین داده‌های دو خانواده روسازی (با ترافیک سبک و ترافیک سنگین) تایید می‌شود.

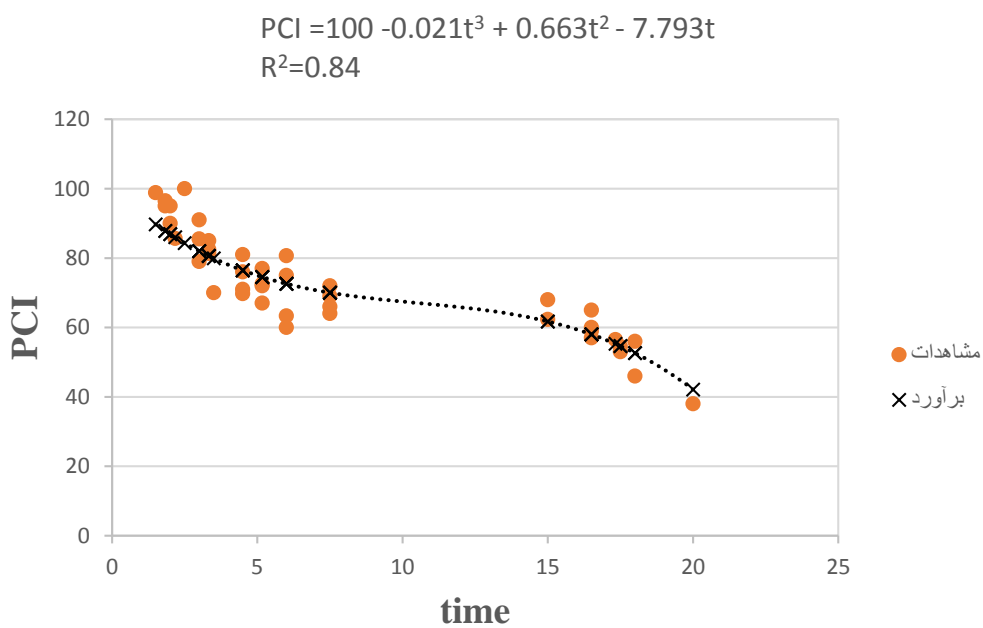
جدول ۳. مدل‌های رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد روسازی

ضریب همبستگی	مدل	نوع مدل رگرسیون	خانواده روسازی
$R^2 = 0.88$	$PCI = 100 - 0.006 N^2 - 2.571 N$	درجه دو	خانواده یک: ترافیک سنگین
$R^2 = 0.90$	$PCI = 100 - 0.11 N^3 + 0.265 N^2 - 3.824 N$	درجه سه	
$R^2 = 0.92$	$PCI = 100 - 0.002 N^4 + 0.057 N^3 - 0.518 N^2 - 1.512 N$	درجه چهار	خانواده دو: ترافیک سبک
$R^2 = 0.78$	$PCI = 100 + 0.172 N^2 - 5.597 N$	درجه دو	
$R^2 = 0.84$	$PCI = 100 - 0.021 N^3 + 0.663 N^2 - 7.793 N$	درجه سه	
$R^2 = 0.87$	$PCI = 100 - 0.063 N^4 + 0.086 N^3 - 0.539 N^2 - 4.197 N$	درجه چهار	

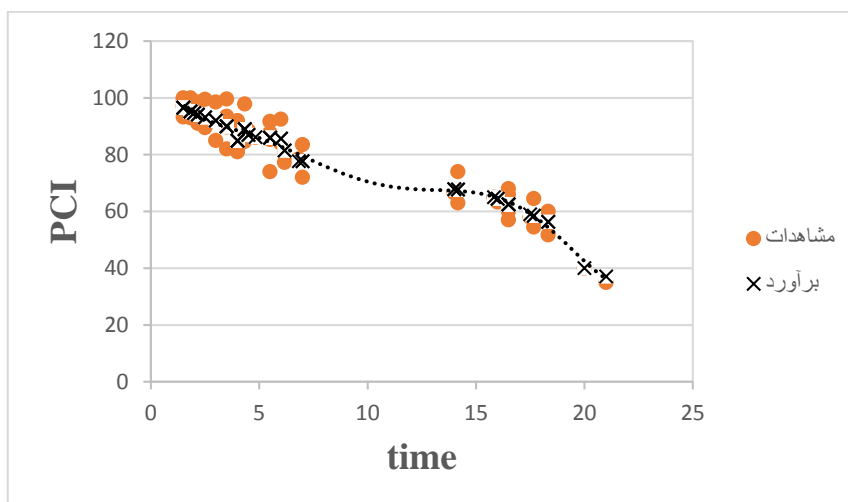
پیش‌بینی عملکرد روسازی با تلفیق مدل خانواده و شبکه عصبی.....



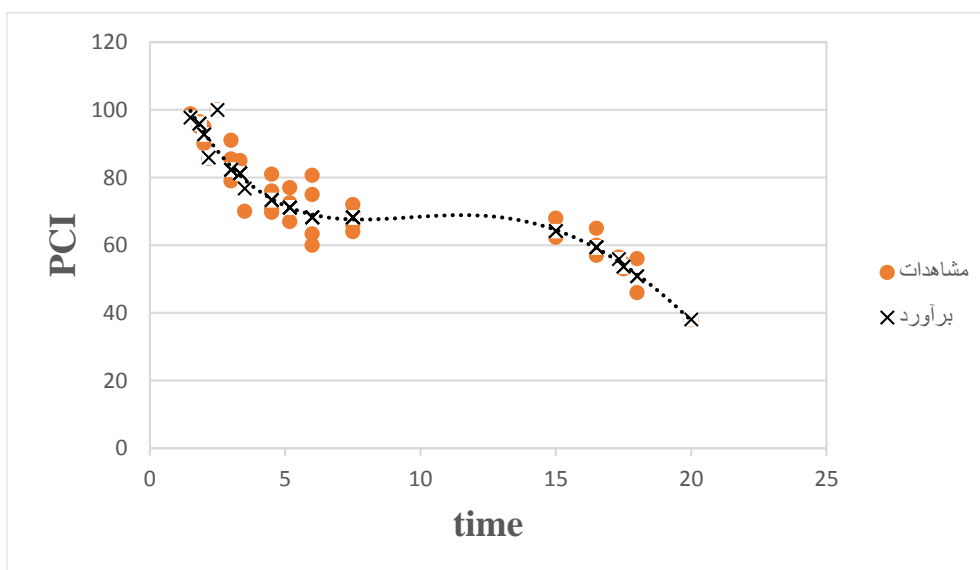
شکل ۱. مدل رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد خانواده یک روسازی



شکل ۲. مدل رگرسیون برای پیش‌بینی عملکرد خانواده دو روسازی



شکل ۳. پیش بینی عملکرد خانواده یک روسازی با شبکه عصبی



شکل ۴. پیش بینی عملکرد خانواده دو روسازی با شبکه عصبی

## ۶. شبکه عصبی در هر خانواده روسازی

به منظور تلفیق مدل خانواده با شبکه عصبی، برای هر خانواده بطور جداگانه اقدام به مدلسازی پیش‌بینی عملکرد روسازی با استفاده از بانک اطلاعاتی آن خانواده توسط شبکه عصبی مصنوعی شده است. در این مورد یک شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) طراحی شده است. به این ترتیب که ابتدا ساختارهای متفاوت برای شبکه عصبی بررسی شد و سرانجام شبکه شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی انتخاب

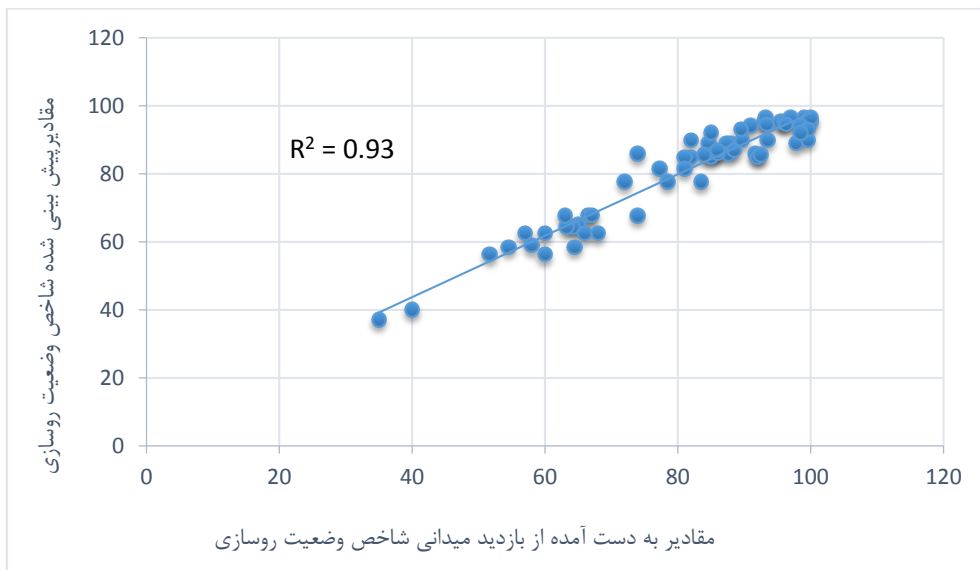
همچنین برای پیش‌بینی عملکرد قطعات مربوط به خانواده دو روسازی (ترافیک سبک) استفاده از مدل رگرسیون درجه سه پیشنهاد می‌شود. این مدل نیز شیب غیرمثبت داشته و ضریب همبستگی آن ۰/۸۴ است که برازش خوبی را نشان می‌دهد. در شکل (۲) مدل مزبور و داده‌های موجود مربوط به آن ملاحظه می‌شود.



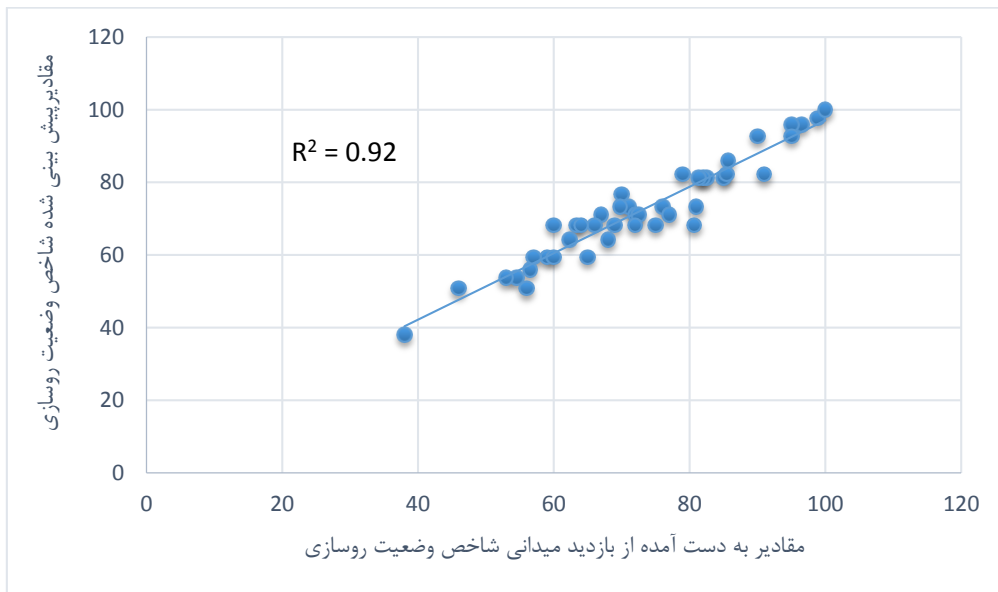
## پیش‌بینی عملکرد روسازی با تلفیق مدل خانواده و شبکه عصبی.....

همانطور که در شکل‌های فوق دیده می‌شود، شبکه عصبی (MLP) برای هر خانواده روسازی به خوبی توانسته است عملکرد روسازی را برآورد نماید. در شکل (۵) و (۶) معیار نکویی برازش برای هر دو خانواده روسازی (با ترافیک سبک و ترافیک سنگین) مشخص می‌شود. ضریب همبستگی ۰.۹۳ برای خانواده یک روسازی و ۰.۹۲ برای خانواده دو روسازی نشان دهنده دقت خوب و قابل قبول مدل است.

گردید. تعداد نرون‌های لایه میانی با سعی و خطا ۱۰ نرون بدست آمد. در لایه مخفی از تابع انتقال سیگموئیدی و در لایه خروجی از تابع انتقال خطی استفاده شده است. در هر خانواده روسازی ۸۵٪ داده‌ها بطور تصادفی جدا شده و برای آموزش شبکه از آنها استفاده شده است و ۱۵٪ داده‌های باقیمانده نیز برای آزمایش و صحت سنجی شبکه بکار رفته است. داده‌های جمع آوری شده در این مطالعه و برآوردهای شبکه عصبی برای دو خانواده روسازی در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۵. همبستگی اندازه گیریها با پیش‌بینی توسط شبکه عصبی برای خانواده یک روسازی



شکل ۶. همبستگی اندازه گیریها با پیش‌بینی توسط شبکه عصبی برای خانواده دو روسازی

شامل معابر با ترافیک سبک و ضخامت کم آسفالت است.

- برای هر خانواده روسازی با استفاده از روش رگرسیون اقدام به مدلسازی شده و مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. در هر دو خانواده روسازی مدل رگرسیون درجه سه دقت بسیار خوبی داشته (ضریب همبستگی ۹۰٪ برای خانواده یک روسازی و ضریب همبستگی ۸۴٪ برای خانواده دو روسازی) و برای مقاصد مدیریت روسازی در شهر ساری پیشنهاد می‌شوند.

- برای هر خانواده روسازی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) اقدام به پیش‌بینی عملکرد روسازی شده و در هر خانواده روسازی این شبکه دقت بسیار خوبی داشته (ضریب همبستگی ۹۳٪ برای خانواده یک روسازی و ضریب همبستگی ۹۲٪ برای خانواده دو روسازی) و برای مدیریت روسازی در معابر شهر ساری نیز قابل استفاده است.

- دقت خوب مدل‌ها به دلیل استفاده از ایده خانواده روسازی بوده است بطوری که علی‌رغم فقط یک مرتبه ارزیابی روسازی توانسته است عملکرد روسازی و نحوه افت کیفیت آن را با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی نماید. در صورت تکرار ارزیابیها در آینده و افزودن اطلاعات جدید به بانک اطلاعاتی فعلی، مدل‌ها بهبود یافته و دقت بیشتری خواهند داشت.

- تلفیق مدل خانواده با شبکه عصبی به نتایج بهتری نسبت به روش رگرسیون منجر شده است.

نکته مهمی که باید بر آن تاکید شود، این است که مدل‌های پیش‌بینی عملکرد روسازی که در این مقاله معرفی شدند، چه رگرسیون و چه شبکه عصبی، بر اساس داده‌های فقط یک مرتبه ارزیابی روسازی بدست آمده است و دقت خوبی را بدست داده است. ضریب همبستگی در محدوده ۸۸٪ تا ۹۳٪ این دقت را تایید می‌نماید. در حالیکه در روش‌های مرسوم مدلسازی عملکرد روسازی لازم است حداقل در سه تا پنج سال متوالی ارزیابی روسازی انجام شود تا بتوان مدل مناسبی را ارائه کرد.

در عین حال، اگر در سال‌های بعد ارزیابی مجدد روسازی انجام شود مدل‌های حاصل از این مطالعه بهبود یافته و دقت بسیار بیشتری را از خود نشان خواهند داد. این امر به دلیل استفاده از ایده خانواده روسازی میسر شده است. در این نوع مدلسازی با روشی ساده و ارزان به بیشترین دقت ممکن در پیش‌بینی عملکرد روسازی می‌توان دست یافت.

## ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله پیش‌بینی عملکرد روسازی با تلفیق مدل خانواده و شبکه عصبی تهیه شد. برای این منظور از خیابان‌های اصلی شهر ساری به عنوان یک مطالعه موردی استفاده شد. شاخص کیفیت روسازی (PCI) و عمر روسازی در قطعات مختلف این شبکه ارزیابی و اندازه‌گیری شد. روسازیها با توجه به ترافیک و طرح روسازی آنها به دو خانواده شامل ترافیک سبک و ترافیک سنگین تقسیم شد. در هر خانواده هم از روش رگرسیون و هم از شبکه عصبی برای پیش‌بینی عملکرد روسازی استفاده شد. بر اساس آنچه در قسمتهای قبل ذکر شد، موارد ذیل به عنوان نتایج حاصل از این تحقیق بیان می‌شود:

- پیش‌بینی عملکرد روسازی بر اساس ایده مدل خانواده روشی ساده، سریع و دقیق است که با شکستن یک مدل پیچیده به مجموعه‌ای از مدل‌های ساده‌تر کار پیش‌بینی را تسهیل می‌نماید.

- در این تحقیق به دلیل مشابهت زیرسازي معابر در شهر ساری از عامل ترافیک و ضخامت آسفالت برای تفکیک دو مدل خانواده روسازی استفاده شد. بر این اساس خانواده یک روسازی شامل معابر با ترافیک سنگین و ضخامت زیاد آسفالت و خانواده دو روسازی

## ۸. مراجع

- Robinson, R., Danielson, U. and Snaith, M. (1998) "Road maintenance management", Macmillan Pub., UK.
- 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.
- Shah, Y.U., Jain, S.S., Tiwari, D., Jain, M.K., (2013) "Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network", Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 104, pp. 332 – 341.
- Shahin, M.Y. (2002) "Pavement management for airports, roads and parking lots", Krieger Pub. Inc., USA .
- 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.
- Butt, A. A., Shahin, M.Y. Feighan, K.J. and Carpenter, S.H. (1992) "Pavement performance prediction model using the Markov process", TRR-1123, pp. 12-19.
- Construction Engineering Research Laboratory (2014) "PAVER 7.0 user manual", U.S. Army Corps of Engineers, USA.
- Haas, R., Hudson, W.R. and Zaniewski, J. (1994) "Modern pavement management", Krieger Pub. Co., USA
- HDM-4 (2000) "HDM-4 manual series", Vol. 4, PIARC.
- Karasahin, M., Terzi, S. (2016) "Performance model for asphalt concrete pavement based on the fuzzy logic approach", Transport, Vol. 29:1, pp. 18–27.
- 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.

## حسین قاسم زاده طهرانی، میلاد جعفرنژاد

حسین قاسم زاده طهرانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۳ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری در سال ۱۳۷۶ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۹۰ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستمهای مدیریت روسازی و ارزیابی های غیرمخرب روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



میلاد جعفرنژاد، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه بابل و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستمهای مدیریت روسازی و مدلهای پیش بینی عملکرد روسازی است.

