

## تعیین عدد سازه‌ای موثر روسازی بر اساس شاخص ناهمواری و خرابی سطحی با استفاده از مدل‌های رگرسیون و شبکه عصبی

منصور فخری\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
رضا شهنی دزفولیان<sup>۱،۲</sup>، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
بخش برنامه‌ریزی حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

صفحه ۲۲۱-۲۰۷

### چکیده

اطلاع از وضعیت سازه‌ای روسازی می‌تواند نقش موثری در پیاده‌سازی و اجرای یک سیستم مدیریت روسازی کارآمد داشته باشد. تعیین عدد سازه‌ای موثر می‌تواند در طراحی، بهسازی و تعمیر و نگهداری، تعیین مقاطع همگن و پیش‌بینی خرابی روسازی و شناسایی مقاطع نیازمند به آزمایش‌های تکمیلی میدانی مد نظر قرار گیرد. یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه عدد سازه‌ای، استفاده از روش‌های غیر مخرب با استفاده از دستگاه افت و خیز سنخ لرزه‌ای (FWD) می‌باشد. لیکن هزینه انجام تست‌های میدانی، نیاز به کنترل ترافیک و محدودیت در سرعت انجام کار، از مواردی مهمی است که استفاده از دستگاه FWD را در سطح پروژه و به ویژه در سطح شبکه با محدودیت مواجه ساخته است. در این مقاله تلاش می‌گردد در راستای توسعه روش‌های موجود، با استفاده از روش‌های سریع و نسبتاً اقتصادی، عدد سازه‌ای موثر روسازی را با ترکیب شاخص ناهمواری و خرابی سطحی تعیین نمود. بدین منظور ۵۲ کیلومتر از راه‌های شریانی استان کرمانشاه و ایلام با مشخصات مختلفی چون ترافیک، عمر روسازی، ضخامت لایه‌های روسازی و انواع خرابی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، از دستگاه FWD جهت محاسبه افت و خیز در هر مقطع، از دستگاه RSP جهت برداشت ناهمواری (IRI) و از دستگاه RD-3VV و بازدید چشمی جهت بررسی خرابی‌های سطحی و تعیین شاخص ارزیابی سطح روسازی (PASER) استفاده شد. به منظور برآورد عدد سازه‌ای موثر، دو شاخص ناهمواری و PASER به عنوان متغیرهای ورودی در مدلسازی در نظر گرفته شدند. جهت مدلسازی از مدل‌های رگرسیون توانی، خطی چند جمله‌ای و شبکه عصبی با معماری مختلف استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که می‌توان عدد سازه‌ای را با دقت بالا و خطای کم تعیین نمود. همچنین یافته‌های این مقاله، بر برتری و توانایی نسبی استفاده از مدل‌های شبکه عصبی در مقایسه با دیگر مدل‌های رگرسیون دلالت دارد.

واژه‌های کلیدی: عدد سازه‌ای موثر، امتیازدهی و ارزیابی سطح روسازی، شاخص ناهمواری بین‌المللی، مدل شبکه عصبی، مدل رگرسیون

### ۱- مقدمه

نگهداری و بهسازی راه‌ها، اجرایی نمودن سیستم مدیریت روسازی به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری و قابل اعتماد ضروری است. یقیناً، تعیین نیازهای نگهداری و بهسازی، بودجه مورد نیاز، پیش‌بینی وضعیت آینده روسازی و بازخورد گزینه‌های مرمت، به عنوان یکی از اجزاء کلیدی و مهم سیستم مدیریت روسازی می‌باشد (Huang, 2004), (Kirbas and Karasahin, 2016), (Elbagalati et

حفظ نقش ارتباطی راه در شرایط ایمن و سطح عملکردی مناسب، بدون برنامه‌ریزی و مدیریت راه امکان پذیر نمی‌باشد. مدیریت روسازی شامل اجزا و تکالیفی چون مشخص نمودن فعالیت‌ها، برنامه‌ریزی، تامین و تخصیص منابع و ارزیابی وضعیت عملکرد در چارچوب یک سامانه مدیریتی می‌باشد (Robinson, Dabielsion and Snaithe, 1998). نظر به زوال روسازی و نیاز روزافزون به

بین عدد سازه‌ای یا عمر باقی مانده سرویس‌دهی روسازی با شاخص‌های غیر سازه‌ای چون شاخص ناهمواری، شاخص کیفیت سواری و خرابی‌های سطحی به تنهایی و در مواردی بدون پرداختن دقیق به مدل‌های پیش‌بینی بررسی شده است (Fredrick Flora, Ping Ong and Sinha, 2010). (Sollazzo, Fwa and Bosurgi, 2017), (Al-Rada et al, Suleiman and Shiyab, 2003), (2012). مطالعات متعددی در خصوص ارزیابی وضعیت روسازی با استفاده از روش‌های غیر مخرب انجام شده است. یکی از مهمترین مطالعات مربوطه توسط هوراک و همکاران انجام گردید، که در آن ارزیابی وضعیت سازه‌ای لایه‌های روسازی، بر اساس اندازه‌گیری افت و خیز توسط دستگاه FWD (Horak, Emrey and Maina, 2015), (Horak, 2008). آنها نتیجه گرفتند که به واسطه تاثیر وضعیت رفتار لایه‌های سازه‌ای روسازی بر خرابی‌های سطحی، می‌توان بین سیستم رتبه‌دهی چشمی وضعیت روسازی، که با کدگذاری رنگی در سه سطح خوب، هشدار یا شدید بیان می‌شود و ارزیابی وضعیت سازه‌ای روسازی ارتباط برقرار کرد. علیرغم این تلاش، هیچ رابطه تحلیلی و ریاضی به منظور تعیین وضعیت عدد سازه‌ای روسازی بدون استفاده از دستگاه FWD و براساس خرابی‌های سطحی روسازی ارائه نگردید. در تلاش دیگری، زانگ و همکاران، مقاومت سازه‌ای لایه آسفالت را با یک رابطه خطی، که تابعی از ناهمواری، شیارشدگی و ضخامت کل روسازی می‌باشد، تعیین نمودند (Wu, Zhang and Abadie, 2013). علیرغم وجود نتایج قابل قبول برای لایه آسفالت آنها هیچ رابطه تحلیلی برای ارزیابی عدد سازه‌ای موثر کل روسازی ارائه نکردند. همچنین تمرکز مدل بر روسازی با اساس خاکی سیمانی، نادیده گرفتن خرابی‌هایی چون ترک‌های طولی، سوسماری و حرارتی، که از شرایط ترافیک، آب و هوا، و مواد و مشخصه-های لایه روسازی تاثیر می‌پذیرند (Schwartz et al, 2011)، از مسائل مهمی است که مد نظر قرار نگرفته است. صالح، کومالی و همکاران با استفاده از دفלקتوگراف و FWD علاوه بر تمرکز بر پارامترهای افت و خیز، ارتباط آنها را با ارزیابی سازه‌ای لایه‌های روسازی بررسی کردند. آنها هیچ رابطه‌ای جهت تعیین عدد سازه‌ای با استفاده از

(al, 2016), Marcelino, Lurdes and Fortunato, (2018). وضعیت روسازی معمولاً با اندازه‌گیری کیفیت سواری یا ناهمواری، خرابی‌های سطحی، کفایت سازه‌ای و اصطکاک روسازی ارزیابی می‌گردد (Robinson, Dabielsion and Snaith, 1998). ارزیابی سازه‌ای روسازی، با استفاده از روش‌های مخرب یا غیر مخرب، اطلاعات ارزشمندی را از ظرفیت موجود باربری و عمر باقی مانده، وضعیت سلامت هریک از لایه‌های روسازی و انتخاب گزینه مناسب نگهداری و بهسازی و یا بازسازی در اختیار ادارات راه قرار می‌دهد (Goel and Das, 2008), (Ruey Chang et al, 2002). همچنین با اطلاع از وضعیت سازه‌ای لایه‌های روسازی می‌توان در خصوص علت خرابی‌های موجود در یک مقطع روسازی، چگونگی توسعه آنها در آینده و روش‌های به تاخیر انداختن زوال روسازی، اطلاعات بیشتری بدست آورد (Wu, Zhang and Abadie, 2013), (Ruey Chang et al, 2002). ارزیابی وضعیت سازه‌ای به عنوان یک روش پایش سلامت روسازی و فاکتور تصمیم‌گیری در مدیریت روسازی، در سطح شبکه و پروژه استفاده می‌گردد (Fredrick Flora, Ping Ong and Sinha, 2010). نظر به اهمیت برنامه‌ریزی و مدیریت نگهداری روسازی، مطالعات متعددی برای ارزیابی وضعیت سازه‌ای روسازی انجام شده است (Marecos et al, 2017), (Saleh, 2016), (Hyun Nam et al, 2015), (Kavussi et al, 2017), (Nam et al, 2013). با این حال، امروزه علیرغم وجود روش‌ها و تجهیزات غیر مخرب مانند دستگاه افت و خیز سنج لرزه‌ای (FWD)، عواملی چون هزینه قابل توجه جمع‌آوری و تحلیل داده، کنترل ترافیک و مشکلات ایمنی بر فراوانی ارزیابی سازه‌ای با استفاده از دستگاه FWD نیز به ویژه در سطح شبکه تاثیر گذاشته‌اند (Elbagalati et al, Fredrick Flora, Ping Ong and Sinha, 2016), (Gedafa et al, 2013), (Chi, Murphy and Zhang, 2014). به منظور فائق آمدن بر این فاکتورهای محدود کننده، تلاش‌های بسیاری با هدف امکان ارزیابی وضعیت و مقاومت سازه‌ای، با استفاده از دیگر روش‌ها و شاخص‌های رایج غیرسازه‌ای، با هزینه کمتر و سرعت بالاتر در مقایسه با FWD، انجام شده است. در واقع، ارتباط

توسط FWD، بازدید میدانی و تست مواد (کرگیری) و یا تعیین عمر باقی مانده (خستگی ناشی از ترافیک) و با تعیین عدد سازه ای موثر، انجام می گردد (Huang, 2004).

## ۲- کارایی شبکه‌های عصبی

سیستم‌های شبکه عصبی مصنوعی با الگو برداری از ساختار مغز انسان، عملکرد مغز را به صورت مدل‌های ریاضی ساده شده شبیه‌سازی می‌کنند. این ابزارهای کاربردی، نقش موثری در استخراج اطلاعات تجربی، مدلسازی و حل مسائل متنوع و پیچیده دارند (Sollazzo, Fwa and Bosurgi, 2017) و (Fuller, 1995). شبکه‌های عصبی می‌توانند به واسطه وجود اجزا پردازشگر (نرون‌ها) و ارتباط آنها با یکدیگر، علاوه بر انطباق خود با تغییرات محیطی، موضوعات، الگو و فرآیندهای جدید را پس از آموزش یاد بگیرند (Fuller, 1995). شبکه چند لایه پیشخور با الگوریتم یادگیری، به عنوان یک ابزار کاربردی رایج و کاربردی شامل حداقل یک لایه پنهان بین لایه ورودی (لایه غیر محاسباتی) و لایه خروجی نرونها می‌باشد. لایه پنهان به واسطه گره‌های (نود) محاسباتی، توابع انتقال، وزن‌های مربوط به لایه قبلی (ورودی) و گره بایاس، که به عنوان اصلاح کننده وزن‌های ورودی تابع انتقال می‌باشد، لایه ارتباطی بین ورودی و خروجی شبکه عصبی می‌باشد (Haykin, 2009)، (Heravi and Eslamdost, 2015)، (Awodele and Jegede, 2009). کاربردهای مختلفی از شبکه‌های عصبی در بخش‌های مختلف صنعت، مهندسی، و علوم و تجارت ارائه شده است. از میان موارد مرتبط با مهندسی مدیریت روسازی، مطالعات متعددی در خصوص استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای ارزیابی وضعیت روسازی و تعیین ارتباط بین شاخص‌های عملکردی و سازه‌ای انجام شده است. سولازو و همکاران، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بررسی داده‌های عملکرد بلند مدت روسازی، ارتباط بین عدد سازه‌ای موثر و تنها IRI را بررسی کردند. آنها پارامترهای متعددی چون سازه‌ای، ترافیکی، آب و هوایی و عملکردی را به عنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفتند و سه شبکه عصبی مختلف را برای پیش‌بینی آموزش دادند (Sollazzo, Fwa and Bosurgi, 2017). تعداد قابل توجه داده‌های ورودی مورد نیاز جهت مدلسازی و در

روش‌های سریع و کم‌هزینه ارزیابی روسازی چون اندازه‌گیری ناهمواری و خرابی‌های سطحی، ارائه نمودند (Saleh, 2016) و (Kumali, Sangpetmgam and Chalermpong, 2014).

این مقاله تلاش اولیه‌ای است در راستای امکان ارزیابی سازه‌ای روسازی و کمک به ادارات راه جهت فائق آمده بر محدودیت‌های استفاده از تجهیزات تست غیر مخرب افت و خیز، با استفاده از IRI و خرابی‌های سطحی روسازی در سطح شبکه. در چارچوب این هدف، نویسندگان رابطه بین عدد سازه‌ای موثر روسازی را بر اساس پارامترهای کاسه افت و خیز و خرابی‌های حاصل از بررسی میدانی وضعیت روسازی، با استفاده از مدل‌های رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی ارائه می‌دهند. در این راستا و به جهت جمع آوری داده‌های مورد نیاز، ارزیابی میدانی وضعیت روسازی برای ۵۲ کیلومتر از راه‌های اصلی دو استان کرمانشاه و ایلام در ایران، با استفاده از FWD، پروفیل‌سنج سطح روسازی، بازدید چشمی و تصویربرداری انجام شده است. جهت اندازه‌گیری خرابی‌های سطحی روش رتبه‌بندی ارزیابی سطحی روسازی (PASER)، به عنوان یک شاخص ترکیبی، استفاده شده است (Walker, Entine and Kummer, 2002) و (AASHTO, 2012). در این مقاله، دو شاخص IRI و PASER با یکدیگر ترکیب می‌شوند و ارتباط بین آنها و عدد سازه‌ای موثر به واسطه مدل توانی، مدل خطی چند جمله‌ای و مدل عصبی بیان می‌گردد. اگرچه نتایج مدل‌های رگرسیون می‌تواند قابل قبول باشند، لیکن مقادیر بیشتر ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین مربعات خطا (MSE) کمتر مدل‌های هوشمند، امکان استفاده از مدل‌های شبکه عصبی را برای برآورد عدد سازه‌ای موثر روسازی، با استفاده از روش‌های سریع و مقرون به صرفه غیر مخرب تصدیق می‌کند. به واسطه راه حل پیشنهادی ما، ادارات راه می‌توانند با ترکیب دو شاخص IRI و PASER، ارزیابی وضعیت سازه‌ای روسازی را انجام دهند و ضمن تعیین گزینه‌های مناسب نگهداری و بهسازی (طرح روکش)، جهت پیش‌بینی وضعیت خرابی و تعیین آزمایش‌های مورد نیاز تکمیلی (جهت ارزیابی لایه‌ها) به اطلاعات مورد نیاز دست یابند. در حال حاضر ارزیابی ظرفیت سازه‌ای موثر روسازی، به واسطه روش‌های متفاوتی چون اندازه‌گیری افت و خیز

(SC) به وسیله عدد سازه‌ای (SN) بیان می‌شود. یک روسازی در شروع عمر سرویس‌دهی دارای یک ظرفیت سازه‌ای اولیه می‌باشد، با گذشت زمان و افزایش بار عبوری، روسازی به تدریج دچار زوال می‌شود و ظرفیت سازه‌ای و قابلیت سرویس‌دهی آن به سطح قابل قبول کاهش می‌باشد. در این حالت ظرفیت سازه‌ای موجود، ظرفیت سازه‌ای موثر نامیده می‌شود که با عدد سازه‌ای موثر برابر می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت تعیین عدد سازه‌ای موثر وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به: (۱) تست مواد و مصالح و بازدید چشمی وضعیت، (۲) روش‌های غیر مخرب بر مبنای افت و خیز و (۳) عمر باقی مانده بر اساس خستگی (ترافیک) اشاره نمود (Huang, 2004). در ادامه فرمول کلی نحوه محاسبه عدد سازه‌ای موثر بر اساس روش اول و دوم ارائه شده است.

$$SN_{eff} = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (1)$$

در رابطه فوق  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  به ترتیب ضرایب لایه‌های آسفالت، اساس و زیر اساس،  $D_1$ ،  $D_2$  و  $D_3$  ضخامت لایه‌های آسفالت، اساس و زیر اساس می‌باشند. به همین ترتیب  $m_2$  و  $m_3$  ضرایب زهکشی لایه‌ها هستند. مقادیر ضرایب لایه‌ها و ضرایب زهکشی بر اساس جداول ذکر شده در AASHTO 93 بدست خواهند آمد (Huang, 2004). در روش دوم نیز که بر اساس نتایج حاصل از تست افت و خیز می‌باشد، عدد سازه‌ای موثر تابعی از مدول موثر کل لایه‌های روسازی ( $E_p$ ) بر بالای بستر و ضخامت کل لایه‌های بالای ساب‌گرید می‌باشد.

$$SN_{eff} = 0.0045H\sqrt[3]{E_p}$$

تواند در برگزیده کل لایه‌های روسازی به همراه بستر نیز باشد (Kavussi et al, 2017) و (Horak, Hefer and Mainna, 2015). از جمله مدل‌هایی که با استفاده از داده‌های افت و خیز توسط هوراک توسعه داده شده در ادامه بیان شده است.

$$SN_{eff} = e^{5.12AUPP-0.78BLI} \quad (3)$$

در زمان اندازه‌گیری پارامترهای کاسه افت و خیز می‌باشد که شامل کل لایه‌های سازه‌ای بالای بستر می‌باشد. همچنین به منظور ارزیابی سازه‌ای کل لایه روسازی به همراه بستر، می‌توان از عدد سازه‌ای اصلاح شده موثر طبق رابطه ۴

نظر نگرفتن دیگر خرابی‌های روسازی از موارد مهمی است که بر ضرورت بهبود مدل تاکید می‌کند. پلاتی و همکاران، مدل شبکه عصبی را برای پیش‌بینی کرنش کششی آسفالت، که با ارزیابی سازه‌ای روسازی در ارتباط است، با استفاده از داده‌های افت و خیز، شاخص انحنا سطح و ضخامت لایه آسفالت استفاده نمودند (Plati, Georgiou, and Papavasiliou, 2015). امین و همکاران، شبکه عصبی بازگشتی را، که بر اساس شبکه پرسپترون چند لایه و تابع انتقال سیگنوییدی ساخته شده است، برای برآورد شاخص وضعیت روسازی پیشنهاد دادند (Amin, and Amador, 2016).

### ۳- اهمیت عدد سازه‌ای موثر

عدد سازه‌ای به عنوان یک شاخص کاربردی، وضعیت سلامت و مقاومت سازه‌ای کل روسازی را نشان می‌دهد. عدد سازه‌ای در اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی و به واسطه آزمایش تست جاده‌ای AASHTO تعیین گردید. در اواسط دهه ۱۹۷۰ آزمایشگاه تحقیقات جاده‌ای و حمل و نقل عدد سازه‌ای اصلاح شده (SNC;SNP) را که شامل تاثیر بستر نیز می‌باشد معرفی نمود (Horak et al, 2015)، (Schnoor, Horak, Hefer and Mainna, 2012). روش‌های مختلفی جهت محاسبه و تعیین ظرفیت باربری سازه‌ای روسازی و محاسبه عدد سازه‌ای در AASHTO پیشنهاد شده است. ظرفیت سازه‌ای روسازی

(۲)

مدل‌های دیگری نیز در توسعه روش‌های وابسته به نتایج افت و خیز و با در نظر گرفتن کل کاسه خیز توسعه داده شده‌اند. در این مدل‌ها به واسطه در نظر گرفتن افت و خیز در محل سنسورهای دور از سنسور مرکزی (به عنوان مثال: فواصل ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری)، عدد سازه‌ای موثر می

در رابطه فوق BLI و AUPP به‌عنوان شاخص‌های سازه‌ای روسازی، به ترتیب بیان کننده وضعیت سازه‌ای اساس و وضعیت سازه‌ای لایه‌های بالایی در روسازی می‌باشند. طبق توضیحات هوراک  $SN_{eff}$ ، عدد سازه‌ای موثر

استفاده نمود: (Horak et al, 2015)، (Schnoor, and ) (2015).

(Horak, 2012) و (Horak, Hefer and Mainna, )

$$SNP_{eff} = SN_{eff} + SNSG \quad (۴)$$

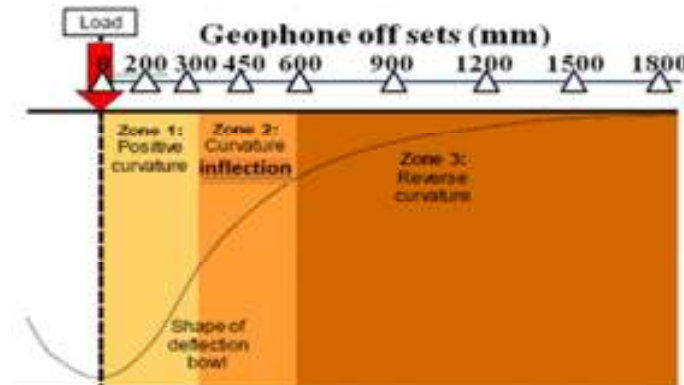
$$SNSG = 3.51(\log_{10} CBR) - 0.85(\log_{10} CBR)^2 - 1.43 \quad (۵)$$

$SNP_{eff}$ : عدد سازه‌ای اصلاح شده موثر،  $SN_{eff}$ : عدد سازه‌ای موثر که از رابطه (۳) به دست می‌آید.  
 $SNSG$ : عدد سازه‌ای بستر، CBR: ضریب باربری کالیفرنیا بستر.

#### ۴- شاخص‌های سازه‌ای کاسه افت و خیز

می‌دهد. ۳ منطقه مجزا: انحنای مثبت، انحنای عطف و منطقه انحنای منفی، به عنوان مناطق تشکیل دهنده کاسه خیز، با رفتار سازه‌ای لایه‌های روسازی در ارتباط هستند (Horak, 2008) و (Horak, Hefer and Mainna, 2015). پارامترهایی که با عدد سازه‌ای موثر در ارتباط هستند در جدول ۱ نشان داده شده است. شاخص لایه اساس (BLI) وضعیت سازه‌ای اساس، و شاخص (Aupp) وضعیت لایه‌های بالای روسازی را نشان می‌دهد (Saleh, 2016) و (Horak, Emrey and Maina, 2015).

به صورت رایج، شبیه‌سازی پاسخ روسازی زیر بار ترافیک و تعیین مدول ارتجاعی لایه‌ها، با اندازه‌گیری کاسه افت و خیز به واسطه استفاده از Fwd، می‌تواند انجام گردد. پارامترهای سازه‌ای متعددی به واسطه اندازه‌گیری افت و خیز در محل ژئوفون‌هایی که در فواصل مختلف از مرکز بارگذاری قرار دارند، ارائه شده است (Marecos et al, 2017)، (Saleh, 2016) و (Horak, Emrey and Maina, 2015). شکل ۱ به عنوان یک مثال، محل قرارگیری ۹ ژئوفون، بار مرکزی، مناطق مجزا و شکل کاسه خیز را نشان



شکل ۱. کاسه خیز و محل قرارگیری ژئوفون‌ها (Horak, Hefer and Mainna, 2015).

جدول ۱. پارامترهای سازه‌ای کاسه افت و خیز

شاخص‌های سازه‌ای	معادله	شرح
BLI	$BLI = D_0 - D_{300}$	اختلاف افت و خیز سنسور ۳۰ و ۰، به عنوان شاخص سازه‌ای اساس
$A_{upp}$	$A_{upp} = (5D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900}) / 2$	وضعیت لایه‌های بالای روسازی را شرح می‌دهد

جدول ۲. مشخصات مسیرها در دو استان کرمانشاه و ایلام

مسیر	طول (کیلومتر)	آسفالت	ضخامت (سانتی‌متر)	ضخامت (سانتی‌متر)	ضخامت (سانتی‌متر)	سن سال	بهسازی، نگهداری		ترافیک		اقلیم	
							آخرین فعالیت انجام شده	زمان از آخرین فعالیت	متوسط حجم ترافیک روزانه در سال AADT	درصد کامیون	آب و هوا	میانگین دمای سالیانه °C
ایلام- چوار	۹	۱۵	۱۵	۱۸	۸	درزگیری	۳	۳۰۰۰	۷	نیمه خشک	۱۶٫۸	
چوار- ایلام	۹	۱۶	۱۵	۱۸	۸	درزگیری	۳	۳۰۰۰	۷	نیمه خشک	۱۶٫۸	
پایانه- پلیس (کرمانشاه)	۸٫۹	۱۱	۱۵	۱۵	۷	روکش نازک	۲٫۵	۳۱۰۰	۲۶	نیمه خشک	۱۵٫۵	
بیستون- سنقر	۲۵٫۱	۱۵	۲۰	۱۸	۱۵	درزگیری	۷	۲۸۰۰	۱۱	نیمه خشک- مدیترانه‌ای	۱۳٫۱	

## ۵- روش تحقیق

استان ایلام و ۳۴ کیلومتر از راه‌های برون شهری استان کرمانشاه، با ترافیک متفاوت، در نظر گرفته شدند. راه‌های انتخاب شده دارای ساختار سه لایه هستند: لایه آسفالت، اساس و زیر اساس دانه‌ای بر بالای بستر، که در روسازی راه‌های ایران بسیار رایج است. همچنین سن روسازی‌های انتخاب شده متفاوت بوده و به طور میانگین از آخرین زمان عملیات نگهداری و بهسازی آنها شامل: درزگیری ترک (نگهداری واکنشی)، میکروسرفیسینگ و یا ... (نگهداری پیشگیرانه) و روکش نازک غیر سازه‌ای (بازیابی سطح) (Robinson, Dabielson and Snaith, 1998)، بیشتر از ۳ سال می‌گذرد. طبقه‌بندی اقلیمی مناطق انتخاب شده، با بررسی داده‌های ۱۰ ساله بارندگی و دما، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای می‌باشد (HDM4, 2004). مشخصات مسیرهای انتخاب شده در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فاکتورهایی چون آب و هوا و میانگین دمای سالیانه به عنوان داده‌های تکمیلی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. زمانی که بررسی تغییرات ناهمواری، خرابی‌های سطحی و عدد سازه‌ای در طول زمان مد نظر باشد می‌تواند مد نظر قرار گیرند.

از آنجایی که پارامترهای متعددی می‌توانند بر نتایج خروجی مدل پیشنهادی تاثیر بگذارند، نویسندگان تصمیم گرفتند که با بررسی سایر مطالعات، نقاط قوت و ضعف را شناسایی کنند. در نهایت، این تلاش منجر به ارائه یک مدل تحلیلی و جامع، با در نظر گرفتن فاکتورهای تاثیرگذار در مدلسازی گردید. به منظور جمع‌آوری داده‌های مدلسازی، در مرحله اول، وضعیت خرابی سطحی و سابقه نگهداری و بهسازی ۷۰۰ کیلومتر از شبکه راه‌های اصلی دو استان کرمانشاه و ایلام مورد بررسی قرار گرفت. از موضوعات مهمی که در انتخاب مقاطع تست باید مد نظر قرار گیرد، تاثیر گزینه‌های نگهداری روسازی بر ناهمواری و وضعیت سازه‌ای روسازی می‌باشد. مشخص است که، کاهش ناهمواری به واسطه انجام نگهداری و بهسازی، لزوماً منجر به بهبود وضعیت سلامت سازه‌ای روسازی نمی‌شود. علاوه بر سابقه نگهداری مقاطع، اطلاع از دیگر فاکتورها مانند شرایط ترافیکی و آب و هوایی (میانگین دمای سالیانه، بارش سالیانه و ...) نیز می‌تواند در صورت نیاز در ارزیابی سازه‌ای روسازی به صورت مستقیم یا غیر مستقیم مد نظر قرار گیرند (Sollazzo, Fwa and Bosurgi, 2017). در این راستا، ۱۸ کیلومتر از راه‌های

برای افت و خیزهای مرکزی بر اساس راهنمای طراحی روسازی آشتو، تهیه شده توسط انجمن ادارات راه آمریکا، در نظر گرفته شد (AASHTO, 1993). همچنین به منظور اصلاح اثر دما بر سایر سنسورهای FWD، از روش استفاده شده در برنامه MODULUS استفاده گردید. در این روش فاکتور اصلاح دما برای سنسورهای FWD در فواصل ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی متری از محل سنسور مرکزی، تابعی از ضخامت بتن آسفالتی و درصدی از ضریب اصلاح دما برای حداکثر افت و خیز در سنسور اول (مرکزی) می باشد (Kavussi et al, 2017) و (Fernando, Liu, and Duchwan, 2001). ارزیابی وضعیت سطحی روسازی نیز با استفاده از شاخص PASER انجام شد. PASER به عنوان یک شاخص ترکیبی بر اساس نظر خبرگان، شامل انواع ترک خوردگی، چاله و وصله، تغییر شکل های سطحی، و نواقص سطحی می باشد (Walker, Entine and Kummer, 2002). به صورت کلی شاخص PASER با امتیاز بین ۱ تا ۱۰، را می توان به صورت یک روش سریع ارزیابی چشمی (روش از پشت شیشه خودرو) توسط ارزیاب تعیین نمود (AASHTO, 2012) در این مقاله به منظور همسان سازی نظرات از روش ارزیابی گروهی (پانل) استفاده شد. همچنین با توجه به اینکه پردازش تصاویر و فیلم می تواند در افزایش صحت ارزیابی تاثیر گذارد، از سیستم RD-3VV، که در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی توسط نویسندگان توسعه داده شد، جهت تصویربرداری از خرابی ها و اندازه گیری خرابی های سطحی و تدقیق PASER نیز استفاده شد. سیستم RD-3VV در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور ارزیابی وضعیت روسازی، شاخص ناهمواری خرابی های سطحی و افت و خیز روسازی مربوط به ۳۱۸ مقطع متفاوت، با فواصل ۱۰۰ متر از یکدیگر، اندازه گیری شدند. همچنین اطلاع از ضخامت لایه های روسازی، مشخصات مصالح و وضعیت زهکشی به واسطه بازدید میدانی، کرگیری آسفالت و گمانه آزمایش، انجام شد. با توجه به تاثیر میانگین ناهمواری مسیرهای چرخ چپ و راست بر خروجی مدل تحلیلی و به منظور تطابق مقدار ناهمواری با محل تست FWD، ناهمواری مسیر چرخ راست، با استفاده از RSP به صورت پیوسته، در نظر گرفته شد (Wu, Zhang and Abadie, 2013) و (Rada et al, 2012). محل تست FWD، در مسیر چرخ راست خط بیرونی یک راه دوخطه و یا چند خطه انتخاب گردید. همچنین به منظور اندازه گیری پارامترهای کاسه افت و خیز، بارگذاری بر اساس تنش تماسی ۵۶۶ kpa (۴۰KN)، که به صورت رایج برای روسازی های آسفالتی استفاده می گردد، مد نظر قرار گرفت (Horak, Emrey and Maina, 2015). از آنجا مقدار میانگین ناهمواری برای یک مقطع ۱۰۰ متری اطلاع دقیقی از مقدار ناهمواری در محل تست FWD در اختیار نمی گذارد، میانگین ناهمواری برای طول پایه ۱۰ متر، ۵ متر از طرفین مرکز محل اندازه گیری افت و خیز، اندازه گیری شد (Rada et al, 2012).

از آنجایی که داده های FWD در دماهای مختلف برداشت و اندازه گیری می شوند، اصلاح دما مطابق با دمای مرجع (۲۰ درجه سانتی گراد)، به عنوان یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر اندازه گیری افت و خیز، ضروری است (Hao, Chen et al, 2000). در همین راستا، فاکتور اصلاح دما



شکل ۲. سیستم RD-3VV برای اندازه‌گیری خرابی‌های سطحی

موثر و جهت ارزیابی وضعیت سازه‌ای روسازی می‌توان از روش هوراک استفاده نمود. اگرچه هدف اصلی این مقاله تعیین عدد سازه‌ای موثر می‌باشد، لیکن می‌توان در تکمیل موضوع و با محاسبه CBR وضعیت کل سازه‌ای روسازی را مورد ارزیابی قرار داد. هوراک با استفاده از روش پنج مارکینگ، ارزیابی وضعیت سازه‌ای را بر اساس سیستم کدگذاری رنگی انجام داد. در واقع، معیار ارزیابی کل روسازی با سه سطح خوب، هشدار و بحرانی مشخص گردید. جدول ۳ ارتباط بین عدد سازه‌ای اصلاح شده موثر و رویکرد ارزیابی را برای روسازی با اساس دانه‌ای و بار KN ۴۰ نشان می‌دهد ( Horak, Emrey and Maina, 2015) و (Horak, 2008).

با توجه به توضیحات فوق در این مقاله، ابتدا مقدار عدد سازه‌ای موثر مطابق با رابطه (۳) و با محاسبه شاخص‌های سازه‌ای BLI و AUPP محاسبه گردید. هم‌زمان با محاسبه عدد سازه‌ای، مقدار ناهمواری و خرابی سطحی نیز در مقاطع مورد آزمایش تعیین شدند. در نهایت نیز تلاش گردید مدل پیش‌بینی  $SN_{eff}$  بر اساس دو متغیر ورودی IRI و PASER ارائه شود.

#### ۵-۱- ارزیابی وضعیت سازه‌ای روسازی

مطالعات متعددی در خصوص رتبه‌دهی وضعیت سازه‌ای با استفاده از پارامترهای کاسه افت و خیز انجام شده است (Horak, 2008)، (Chou 1993) و (Peterson, and Shepard, 1972). در این مقاله، پس از تعیین عدد سازه‌ای

جدول ۳. ارزیابی وضعیت سازه‌ای بر اساس عدد سازه‌ای

ارزیابی وضعیت سازه‌ای	حدود شاخص سازه‌ای
	$SN_{eff}$
Sound	$> 6$
Warning	۴ تا ۶
Severe	$< 4$

#### ۶- نتایج تحلیل

برای برآورد عدد سازه‌ای موثر، در نظر گرفته شده است. به صورت جزء تر، مدل توانی و مدل خطی چند جمله‌ای ارائه شده است. همچنین به منظور بررسی توانایی مدل‌های شبکه عصبی در مقایسه با مدل‌های رگرسیون، شبکه‌های عصبی

به جهت بررسی ارتباط بین شاخص‌های سازه‌ای، ناهمواری و خرابی‌های سطحی، نویسندگان از مدل‌های رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرده‌اند. در همین راستا، ابتدا IRI به تنهایی و سپس ترکیب IRI و PASER

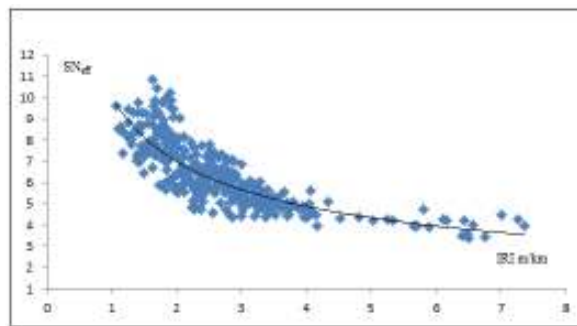


شاخص IRI و PASER را با عدد سازه‌ای موثر، با استفاده از مدل‌های خطی چند جمله‌ای ارائه می‌کند. نتایج خروجی مدل خطی چند جمله‌ای در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

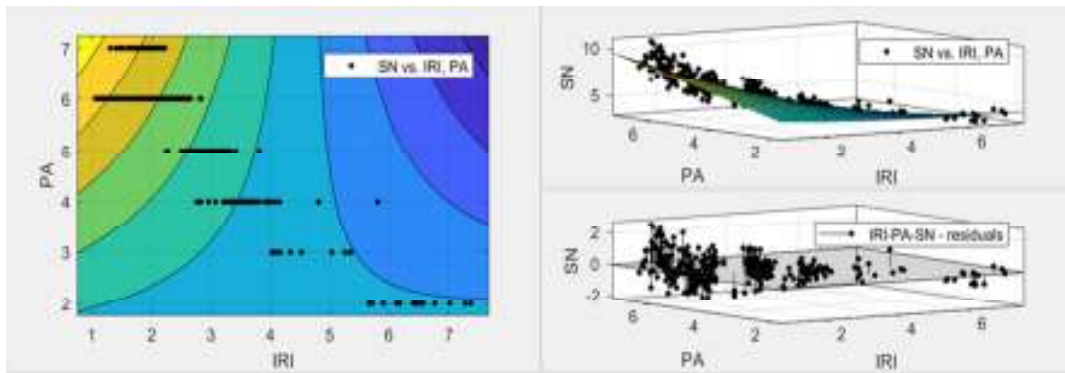
متنوعی توسط نویسندگان آموزش داده شده‌اند. معماری شبکه‌های پیشنهادی دارای ۵ و ۱۰ نرون در لایه پنهان، می‌باشد. در ادامه، نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی ارائه شده است. شکل ۳ ارتباط بین IRI (راست) و عدد سازه‌ای موثر را نشان می‌دهد. نتایج خروجی مدل توانی در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین شکل ۴، ارتباط بین ترکیب دو

جدول ۴. نتایج مدل توانی، ضریب تعیین  $R^2$  و میانگین مربعات خطا (MSE)

متغیر ورودی	معادله	$R^2$	MSE	متغیر خروجی
$IRI_R$	$SN_{eff} = 10.05(IRI_R)^{-0.514}$	0.67	0.76	$SN_{eff}$



شکل ۳. رابطه بین ناهمواری راست و عدد سازه‌ای موثر



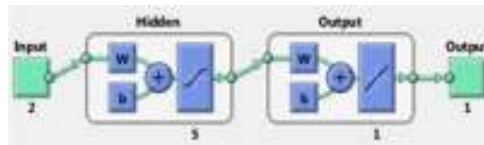
شکل ۴. برآورد عدد سازه‌ای موثر با  $IRI_R$  و PASER

جدول ۵. نتایج مدل خطی چند جمله‌ای

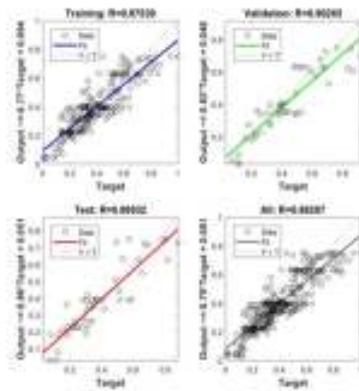
متغیر ورودی	معادله	شرح	$R^2$	MSE	متغیر خروجی
X: $IRI_R$ Y: PASER	$Z = 6.071 - 1.119 X + 0.5295 Y + 0.02918 X^2 - 0.306 XY$	شاخص IRI با میانگین ۲,۶۸۴ و انحراف معیار ۱,۱۴۸ و شاخص PASER با میانگین ۵,۳۴۶ و انحراف معیار ۱,۲۲۸ نرمال شده است	0.73	0.62	$SN_{eff}(Z)$

اعتبارسنجی و تست و هیستوگرام خطا در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. داده های نرمال شده برای آموزش، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۷۰٪، ۱۵٪، و ۱۵٪ از داده های کل می باشند. همچنین در جدول ۶ نتایج خروجی شبکه های عصبی با ۵ و ۱۰ نرون محاسباتی در لایه پنهان نشان داده شده است.

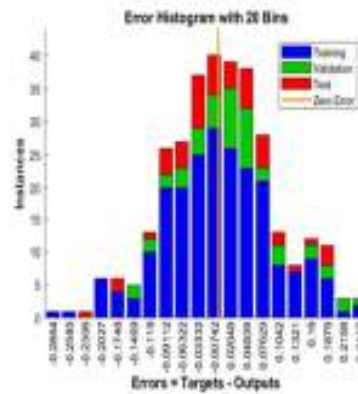
همانطور که بیان شد، در این تحقیق قابلیت مدل هوشمند نسب به مدل های سنتی (رگرسیون) بررسی می شود. شکل ۵، ساختار شبکه عصبی را شامل: ورودی با ۲ نرون، لایه پنهان با ۵ نرون، و لایه خروجی با ۱ نرون نمایش می دهد. همچنین نتایج خروجی مدل شبکه عصبی برای داده های آموزشی،



شکل ۵. معماری شبکه عصبی دولایه

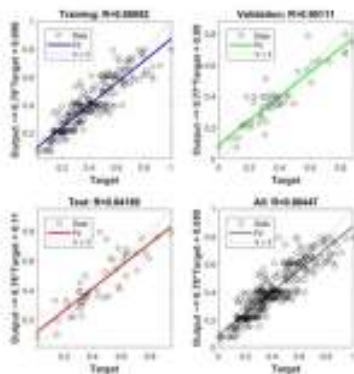


ب: برآورد عدد سازه ای موثر

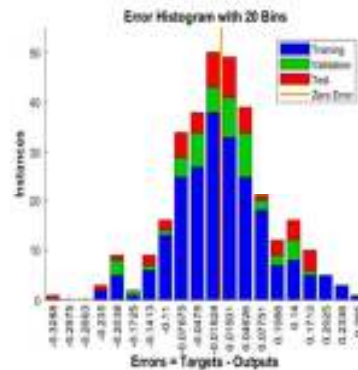


الف: هیستوگرام خطا

شکل ۶. نتایج رگرسیون و هیستوگرام خطا برای عدد سازه ای (۵ نرون)



ب: برآورد عدد سازه ای موثر



الف: هیستوگرام خطا

شکل ۷. نتایج رگرسیون و هیستوگرام خطا برای عدد سازه ای (۱۰ نرون)

جدول ۶. نتایج مدل خطی چندجمله‌ای

متغیرهای ورودی	تعداد نرون	الگوریتم یادگیری	معادله	متغیر خروجی	مرحله	R <sup>2</sup>	MSE
IRI-PASER	۵	Levenberg-Marquardt	Black-Box	SN <sub>eff</sub>	آموزش	۰,۷۷	۰,۰۰۹۱
					اعتبارسنجی	۰,۸۱	
					تست	۰,۸۰	
					کل	۰,۷۸	
IRI-PASER	۱۰	Levenberg-Marquardt	Black-Box	SN <sub>eff</sub>	آموزش	۰,۷۹	۰,۰۰۸۰
					اعتبارسنجی	۰,۸۱	
					تست	۰,۷۰	
					کل	۰,۷۸	

## ۷- بررسی و نقد موضوع

هوشمند عصبی نیز مد نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبکه دو لایه پس انتشار خطا در جدول ۶، بسیار قابل توجه و ارزشمند می‌باشد. همچنین به منظور مقایسه نتایج شبکه های عصبی، از تعداد ۵ و ۱۰ نرون محاسباتی (لایه پنهان) استفاده شده است. اگرچه در شبکه‌های عصبی، معادله بین متغیرهای ورودی و خروجی مشخص نمی‌باشد (Black-Box)، لیکن مقدار R<sup>2</sup> نسبتاً بالا و خطای پایین به وضوح نمایان می‌باشد. نتایج شبکه عصبی نشان می‌دهد که مقدار R<sup>2</sup> برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی، تست و کل داده‌ها نسبت به نتایج مدل‌های جدول ۵ (مدل خطی چند جمله‌ای)، بالاتر می‌باشد. مقدار MSE برای کل داده‌ها نیز به مقدار قابل توجهی پایین‌تر است. بررسی نتایج، توانمندی شبکه‌های عصبی در برآورد شاخص‌های سازه‌ای را تصدیق می‌کند. مقدار ضریب R<sup>2</sup> بالای ۰,۷۷ و MSE برابر با ۰,۰۰۹ وجود یک رابطه قوی را تایید می‌نماید. باید دقت شود که نتایج حاصل از کاربرد ۱۰ نرون محاسباتی در مقایسه با ۵ نرون، تقریباً یکسان می‌باشند. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد، که می‌توان با ترکیب IRI و PASER، عدد سازه‌ای را با دقت مناسب برآورد نمود. برآورد عدد سازه‌ای، اطلاعات ارزشمندی را از وضعیت سلامت سازه‌ای روسازی جهت بهسازی و نگهداری و تعیین عمر باقیمانده فراهم می‌کند. همچنین، برتری مدل‌های هوشمند عصبی در مقایسه با مدل-های رگرسیون سنتی از دیگر نتایج این تحقیق می‌باشد.

بررسی نتایج به دست آمده با استفاده از روش‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی، اطلاعات ارزشمندی را ارائه می‌دهد. مطمئناً، مقایسه و تحلیل نتایج، می‌تواند در انتخاب روش مناسب تعیین عدد سازه‌ای موثر باشد. همانطور که اشاره گردید، در این تحقیق امکان برآورد عدد سازه‌ای موثر با استفاده از شاخص IRI و PASER ارائه شده است. جدول ۴ ارتباط بین SN<sub>eff</sub> و IRI را نشان می‌دهد. به صورت کلی مدل با عملکرد مناسب دارای R<sup>2</sup> بالا و MSE پایین می‌باشد. اگرچه مقدار قابل قبول آنها، تابع داده‌های تحلیل و حدود انتظارات در مساله می‌باشد. با ملاحظه نتایج جدول ۴، مشاهده می‌گردد مقدار R<sup>2</sup> به صورت قابل توجهی خیلی بالا نیست. همچنین مقدار MSE نیز قابلیت بهبود خواهد داشت. از آنجایی که وضعیت لایه‌های روسازی می‌تواند علاوه بر ناهمواری بر دیگر خرابی‌ها چون ترک‌های سوسماری، ترک‌های حرارتی، شیارشدگی و ترک‌های طولی نیز تاثیر گذار باشند (Horak, Emrey and Maina, 2015) و (Schwartz et al, 2011). توسعه مدل‌های موجود (جدول ۴)، با در نظر گرفتن شاخص PASER نیز، انجام شده است (جدول ۵). با ترکیب IRI و PASER میزان R<sup>2</sup> و MSE تا حدودی بهبود یافته است. استفاده از مدل خطی چند جمله‌ای منجر به افزایش ۸ درصدی مقدار R<sup>2</sup> و کاهش ۱۹ درصدی MSE شده است. از آنجا که هدف برآورد یک رابطه قوی بین SN<sub>eff</sub> و شاخص‌های IRI و PASER می‌باشد، بررسی توانمندی‌های شبکه‌های

## ۸- نتیجه گیری

شده، به معنای نادیده گرفتن و عدم استفاده از تجهیزات غیرمخرب سازه‌ای نمی‌باشد. همچنین، این تحقیق می‌تواند یک ابزار مفیدی برای متولیان نگهداری روسازی باشد. اطلاع از وضعیت سلامت روسازی، امکان اطلاع از نیازهای نگهداری و بهسازی و انتخاب گزینه‌های مقرون به صرفه را برای ادارات راه فراهم می‌آورد. همچنین اطلاعات ارزشمندی در خصوص تست‌های تکمیلی آزمایشگاهی و میدانی مورد نیاز در اختیار می‌گذارد.

در این مقاله، یک روش کاربردی برای تعیین عدد سازه‌ای موثر ارائه شده است. یافته‌های این تحقیق بر این دلالت دارد که می‌توان با ترکیب IRI و PASER، عدد سازه‌ای را با دقت مناسبی برآورد نمود. در واقع، با استفاده از روش‌های غیر سازه‌ای سریع و نسبتاً مقرون به صرفه، امکان ارزیابی سازه‌ای روسازی در سطح شبکه فراهم آمده است. در همین راستا، از مدل‌های توانی، خطی چند جمله‌ای و شبکه‌های مختلف عصبی استفاده شده است. ارزیابی نتایج، برتری شبکه‌های عصبی را در مقایسه با سایر روش‌های غیر هوشمند نشان می‌دهد. باید دقت شود که با توجه به هدف ادارات راه، استفاده از روش‌های سازه‌ای در سطح پروژه و شبکه کم‌اکن باید مد نظر قرار گیرد. مطمئناً دستاورد ارائه

## ۱۰- مراجع

-Robinson, R., Danielson U. and Snaith M. (1998), "Road Maintenance Management", University of Birmingham and the Swedish National Road Administration.

-Huang, Yang H. (2004), "Pavement Analysis and Design", 2<sup>th</sup>. Edition, University of Kentucky: Pearson Education.

-Kirbas, U. and Karasahin, M. (2016), "Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads", Journal of Construction and Building Materials, pp. 281-288.

-Elbagalati, O., Elseifi, M., Gaspard, K. and Zhang, Z. (2016), "Development of the pavement structural health index based on falling weight deflectometer testing", the International Journal of Pavement Engineering.

- Marcelino, P., Lurdes Antunes, A. and Fortunato, F. (2018), "Comprehensive performance indicators for road pavement condition assessment", Journal of Structure and Infrastructure Engineering.

## ۹- پی‌نوشت‌ها

1. International Roughness Index (IRI)
2. Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER)
3. Pavement Condition Index (PCI)
4. Annual Average Daily Traffic (AADT)
5. Road Surface Profiler (RSP)
6. Road Data Collection and Assessment System with the support of combined methods (Vision, 3D Reconstruction and Vibration based); RD-3VV.
7. Falling Weight Deflectometer
8. Effective Structural Number ( $SN_{eff}$ )
9. Remaining Service Life (RSL)
10. Ride Quality Index (RQI)
11. Visual Condition Rating
12. Artificial Neural Network (ANN)
13. Mean Square Error (MSE)
14. Long Term Pavement Performance (LTPP)
15. Surface Curvature Index (SCI)
16. Transport and Road Research Laboratory (TRRL)
17. Modified or Adjusted Structural Number (SNC; SNP)
18. Structural Capacity (SC)
19. Effective Modulus ( $E_p$ )
20. Base Layer Index (BLI)

International Journal of Pavement Engineering.

- Kavussi, A., Abbasghorbani, M., Moghadas Nejad, F. and Bamdad, A. (2017), "A new method to determine maintenance and repair activities at network-level pavement management using falling weight deflectometer", *Journal of Civil Engineering and Management*, PP. 338–346.

- Nam, B.H., Murphy, M.R., Zhang, Z. and Arellano, M. (2013), "Improved Structural Condition Index for Pavement Evaluation at Network Level", *Journal of Sustainable and Efficient Pavements* © ASCE.

- Gedafa, D.S., Hossain, M., Miller, R. and Van, T. (2013), "Network-level flexible pavement structural evaluation", *International Journal of Pavement Engineering*.

- Chi, S., Murphy, M. and Zhang, Z. (2014), "Sustainable Road Management in Texas: Network-Level Flexible Pavement Structural Condition Analysis Using Data-Mining Techniques", *Journal of Computing in Civil Engineering*, © ASCE.

- Sollazzo, G., Fwa, T.F. and Bosurgi, G. (2017), "ANN model to correlate roughness and structural performance in asphalt pavements", *Journal of Construction and Building Materials*, pp. 684–693.

- Al-Suleiman, T. and Shiyab, A.M.S. (2003), "Prediction of Pavement Remaining Service Life Using Roughness Data—Case Study in Dubai", *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 4 (2), pp. 121–129.

- Rada, G.R., Perera, R.W., Prabhakar, V.C. and Wiser, L.J. (2012), "Relating

- Goel, A. and Das, A. (2008), "Nondestructive testing of asphalt pavements for structural condition evaluation: a state of the art", *Journal of Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 23, No. 2, pp. 121–140.

- Chang, J.R., Lin, J.D, Chang, W.C. and Chen, D. (2002), "Evaluating the Structural Strength of Flexible Pavements in Taiwan Using the Falling Weight Deflectometer" , *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 3 (3), pp. 131–141.

- Wu, Z., Zhang, Z. and Abadie, C. (2013), "Determining structural strength of existing asphalt layer using condition survey data", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 603–611.

- Flora, W.F., PING, G. and Sinha, K.C. (2010), "Development of a Structural Index as an Integral Part of the Overall Pavement Quality in the INDOT PMS", Publication No: FHWA/IN/JTRP-2010/11, SPR-3062.

- Macecos, V., Fontel, S., Lurdes, M. and Soll, M. (2017), "Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar", *Journal of Construction and Building Materials* .

- Mofresh, S. (2016), "Simplified approach for structural capacity evaluation of flexible pavements at the network Level", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 17, No. 5, PP. 440–448,

- Hyun Nam, B., An, J., Kim, M., Murphy, M.R. and Zhang, Z. (2015), "Improvements to the structural condition index (SCI) for pavement structural evaluation at network level",

Science & IT Education Conference (InSITE).

- Plati, C., Georgiou, P. and Papavasiliou V. (2015) "Simulating Pavement Condition Using Artificial Neural Networks", Journal of Structure and Infrastructure Engineering.

- Amin, S.R. and Amador, L.E. (2016) "Backpropagation Neural Network to Estimate Pavement Performance: Dealing with Measurement Errors", Journal of Road Material and Pavement Design.

- Horak, E., Hefer, A., Emery, S. and Maina, J. (2015), "Flexible road pavement structural condition benchmark methodology incorporating structural condition indices derived from Falling Weight Deflectometer deflection bowls", Journal of Civil Engineering and Construction.

- Schnoor, H. and Horak, E. (2012), "Possible Methods of Determining Structural Number for Flexible Pavements with the falling weight Deflectometer", 31<sup>th</sup> Southern African Transport Conference (SATC2012), Pretoria, South Africa.

-Horak, E., Hefer, A. and Maina, J. (2015), "Modified Structural Number Determined from Falling Weight Deflectometer Deflection Bowl Parameters and its Proposed Use in a Benchmark Methodology", Journal of Traffic and Transportation Engineering, David Publishing.

-Highway Development and Management. (HDM-4). (2004), "Application Guide (Volume2); A Guide to Calibration and Adaption (Volume5) and Modelling Road Deterioration and works effects, Vol.6.

- Hao Chen, D., Bilyeu, J., Hsiung Lin, H. and Murphy, M. (2000), "Temperature

Ride Quality and Structural Adequacy for Pavement Rehabilitation and Management Decisions", TRB Annual Meeting.

- Horak, E., Emery, S. and Maina, J. (2015), "Review of Falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields", 11<sup>th</sup> Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 16-19, Sun City, South Africa.

- Horak, E. (2008), "Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters", Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol 50 No 2, pp. 2-9.

- Schwartz, C.W., Li, R., Hwan Kim, S. and Ceylan, H. (2011) "Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction", National Cooperative Highway Research program, Transportation Research Board of the National Academies, Project 1-47.

-Kumali, Sangpetngam and Chalermpong. (2014) "Development of equations for determining layer elastic moduli using pavement deflection characteristics", TRB Annual Meeting.

-Fuller, R. (1995) "Neural Fuzzy Systems", Abo Akademi University.

-Haykin, S. (2009) "Neural Networks and Learning Machines", McMaster University, Pearson Prentice Hall.

- Heravi, G. and Eslamdoost, E. (2015) "Applying Artificial Neural Networks for Measuring and Predicting Construction-Labor Productivity", Journal of Construction Engineering and Management, © ASCE.

- Awodele, O. and Jegede, O. (2009) "Neural Networks and Its Application in Engineering", Proceedings of Informing

- Walker, D., Entine, L. and Kummer, S. (2002), "Pavement Surface Evaluation and Rating", Asphalt PASER Manual, University of Wisconsin-Madison.
- Pavement Management Guide. (2012), American Association of State Highway and Transportation officials. (AASHTO), 2<sup>th</sup> Edition.
- Chou, Y.J. (1993), "Knowledge-Based System for Flexible Pavement Structural Evaluation", Journal of Transportation Engineering, ASCE.
- Peterson, G. and Shepard, L. W. (1972), "Deflection analysis of flexible pavements", Materials and Test Division Report, Utah State Dept. of Transportation.
- Correction on Falling Weight Deflectometer Measurement", Transportation Research Record 1716, Journal of the Transportation Research Board .
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (AASHTO). (1995), "AASHTO Guide Design of Pavement Structures", Washington D.C. USA.
- Fernandi, E.G., Liu, W. and Ryu, D. (2001), "Development of a Procedure for Temperature Correction of Back-calculated AC Modulus", Texas Transportation Institute, FHWA/TX-02/1863-1.