

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی

(مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

منصور فخری (مستول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

سید مسعود کریمی، کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

محمد رضا قربانی نیک، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

fakhri@kntu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸

دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

چکیده

امروزه راه‌ها به عنوان سرمایه‌های هر کشور تلقی می‌شوند لذا جهت حفظ و نگهداری آن‌ها به یک مکانی‌زم مشخص احتیاج است. در همین راستا سیستم مدیریتی روسازی ابزاری هدفمند برای تصمیم‌گیری و یافتن استراتژی موثر و اقتصادی، جهت ارزیابی، ترمیم، تعمیر و نگهداری روسازی‌ها در سطحی قابل قبول می‌باشد. جهت اجرای این سیستم اطلاع دقیقی از شاخص‌های ارزیابی روسازی امری حیاتی است. هدف از این پژوهش شناخت تائیر خرابی‌های سطحی بر ناهمواری روسازی و ایجاد رابطه همبستگی جهت تخمین شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) و نرخ رشد ناهمواری می‌باشد. بر این اساس با استفاده از دستگاه تشخیص خودکار خرابی‌های روسازی (LCMS)، شاخص ناهمواری و خرابی‌های سطحی روسازی در قطعات ۱۰ متری به صورت پیوسته و با رزولوشن ۱ میلی‌متر در تعدادی از محورهای شریانی کشور ارزیابی شد. پس از تحلیلی اولیه خروجی‌های دستگاه LCMS، خرابی‌های سطحی با تائیر بالاتر بر شاخص ناهمواری شناسایی شد و سپس با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی رابطه همبستگی میان شاخص ناهمواری و خرابی‌های سطحی برقرار شد که در این رابطه، ضریب (R^2) برابر ۰/۷۰ است. این پژوهش، منجر به شناخت خرابی‌های سطحی موثر بر شاخص IRI می‌شود و همچنین استفاده از مدل ارائه شده یک روش کم‌هزینه برای متولیان راه برای تخمین شاخص ناهمواری و نرخ رشد ناهمواری بر اساس خرابی‌های سطحی در سطح شبکه است که می‌تواند موجب شناخت روند اضمحلال و سیاست‌ها و اقدامات تعمیر و نگهداری شود.

واژه‌های کلیدی: روسازی، ناهمواری، خرابی‌های سطحی، IRI، شبکه عصبی.

۱. مقدمه

این پژوهش با هدف شناخت تاثیر خرابی‌های سطحی بر ناهمواری روسازی و ایجاد رابطه همبستگی جهت تخمین شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) و نرخ رشد ناهمواری انجام شد.

۲. ارزیابی عملکرد روسازی

هدف از ساخت روسازی، جلوگیری از بروز و ظهور آسیب دیدگی‌ها و همچنین عبور و مرور راحت، سریع، مطمئن و ایمن در یک سطح هموار است [Iran Highway Asphalt Paving Code, 2011]. بعد از ساخت و شروع بهره‌برداری روسازی شاخص‌های خدمت‌دهی تحت تاثیر عواملی چون بارگذاری ترافیکی و شرایط آب و هوایی کاهش می‌یابد. برای آگاهی از وضعیت روسازی جهت تصمیم‌گیری تعمیر و نگهداری و اجرای سیستم مدیریت روسازی به شاخص‌های کمی نیاز است. در این پژوهش از خرابی‌های سطحی روسازی و شاخص بین‌المللی ناهمواری استفاده شد.

۲-۱ خرابی‌های سطحی روسازی

خرابی‌های سطحی روسازی به دلایل مختلفی بروز می‌کنند از جمله بار وارده که ارتباط مستقیمی با ترافیک عبوری دارد، شرایط آب و هوایی و همچنین به علت عدم انتخاب مصالح مناسب، طراحی نادرست و رعایت نکردن اصول صحیح اجرا به وجود می‌آیند. درجه اضمحلال روسازی تابعی از نوع، شدت و میزان خرابی است. در روش ارزیابی وضعیت روسازی به دلیل تعداد زیاد حالت‌های ممکن، ضرایب کاهندگی به عنوان نوعی ضریب وزنی به منظور تعیین میزان تأثیر هر یک از ترکیبات نوع (۱۹ نوع خرابی در روسازی آسفالتی) و شدت (کم، متوسط و زیاد) و میزان خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد [ASTM D6433-07, 2007]. در ارزیابی خرابی سطحی کارشناس برداشت در محل پروژه حاضر

روسازی راه‌ها سرمایه ملی هر کشور هستند و حمل و نقل جاده‌ای کارا، شرط اصلی در توسعه پایدار و توسعه اقتصادی است. متولی راه برای بالا نگه داشتن سطح سرویس راه‌ها سالیانه بودجه قابل توجهی صرف ترمیم، بهسازی، حفظ و نگهداری راه‌ها می‌کند [Robinson, Danielson and Snaith, 1998]. بودجه مورد نیاز لازم است در یک سیستم اقتصادی مدیریت شود. سیستم مدیریت روسازی ابزاری هدفمند برای مدیران در تصمیم‌گیری و یافتن استراتژی موثر فنی و اقتصادی جهت نگهداری و یا بهسازی روسازی می‌باشد. این سیستم یک سیستم اطلاعاتی، تحلیلی و تکاملی است که اطلاعات آن که شامل پارامترها و شاخص‌های ارزیابی می‌باشد که باید به طور مستمر با برنامه‌ای خاص جمع‌آوری گردد تا اقدامات مناسب نگهداری، تعمیر، ترمیم، بهسازی و... مشخص شود. عدم اطلاع دقیق از این شاخص‌ها منجر به اولویت‌بندی نامناسب، اقدامات نامناسب نگهداری و در نتیجه افزایش هزینه‌های پروژه‌ها می‌شود [Harrison and Park, 2008]. از مهمترین شاخص‌های عملکردی روسازی در راستای اجرای سیستم مدیریت روسازی، می‌توان به شاخص ناهمواری اشاره کرد. همچنین ناهمواری مولفه‌ای جهت تشخیص کیفیت سواری و سطح رضایت کاربران راه است. نامطلوب بودن وضعیت ناهمواری می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های مربوط به خودرو و هزینه سوخت، افزایش گازهای گلخانه‌ای و کاهش بهره‌وری خودرو خواهد شد [Robbins and Tran, 2016]. همچنین ناهمواری روسازی یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر پاسخ دینامیکی روسازی و در نتیجه رشد نرخ خرابی‌ها و همچنین افزایش هزینه‌ها می‌گردد [Schleppi and Roberts, 2002].

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

ناهمواری وجود دارد، ولی امروزه در کشورهای دنیا بیشتر موسسات، آژانس‌ها و متولیان راه از شاخص IRI استفاده می‌کنند. [Schram and Abdelrahman, 2006]. به طوریکه در ایالات متحده آمریکا ۴۳ ایالت (معادل ۸۶ درصد) از شاخص IRI برای ارزیابی ناهمواری استفاده می‌کنند [Múčka, 2017].

۲-۲ پیشینه مدل‌های پیش‌بینی

در گذشته مطالعاتی در خصوص شاخص‌های ارزیابی صورت پذیرفت و محققان به ارائه روابط همبستگی میان شاخص‌های ارزیابی روسازی و عوامل موثر در تغییرات این شاخص‌ها پرداختند. در سال ۲۰۰۲ در یک پژوهش مدل پیش‌بینی خطی شاخص IRI با استفاده از شاخص وضعیت روسازی PCI^4 ارائه شد و ضریب R^2 اصلاح‌شده این مدل برابر با ۰/۵۲ بدست آمد [Dewan and Smith, 2002]. در ادامه در پژوهشی پارک، توماس و وین در سال ۲۰۰۷ یک مدل رگرسیون توانی میان شاخص IRI و شاخص PCI ارائه کردند که برای مقادیر IRI کم، کارایی بهتری داشت. ضریب R^2 برای این رابطه برابر با ۰/۵۹ به‌دست‌آمد [Park and Thomas and WayneLee, 2007]. در تحقیقاتی در سال ۲۰۰۰ به بررسی ارتباط بین خرابی‌های سطحی و ناهمواری روسازی پرداخته شد، این تحقیق در نوادا آمریکا انجام شد که با بررسی ۳۱۷ واحد نمونه و اندازه‌گیری IRI اولیه و ارزیابی مجدد IRI پس از عبور ترافیک ۵ میلیون محور استاندارد معادل شده، درصد ترک‌های خستگی و عمق شیارافتادگی، رابطه همبستگی میان پارامترهای مذکور محاسبه شد. در این رابطه ضریب همبستگی برابر ۰/۷۱ شد و میانگین خطای در IRI پیش‌بینی شده برابر m/km ۰/۱۰۷ است [Mactutis, Sirous and Weston, 2000]. چاندر و همکاران در سال ۲۰۱۳ در کشور هند رابطه جدیدی برای بررسی اثر نوع خرابی‌ها بر ناهمواری ارائه دادند. در این مقاله از روابط غیرخطی و خطی فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

می‌شود و با استفاده از ابزای نظیر متر، شمشه و... با استناد به استاندارد ASTM D6433 نوع، شدت و مقدار خرابی‌ها را تشخیص می‌دهد، در این پژوهش خرابی‌های سطحی روسازی آسفالتی مطابق استاندارد ASTM D6433 شناسایی شده‌اند اما مکانیزم تشخیص به صورت اتوماتیک و از طریق سیستم برداشت اتوماتیک LCMS برداشت و پردازش شده است.

۲-۲ شاخص بین‌المللی ناهمواری

به طور کلی ناهمواری عبارتست از تغییرات تراز روسازی که به خودروهایی عبوری ارتعاش وارد می‌کند [Fakhri, 2009]. شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) که واحد آن m/km است با انجام فرآیندی روی پروفیل روسازی راه محاسبه می‌گردد. مقدار عددی IRI در واقع میزان تجمعی ناهمواری در طول اندازه‌گیری است [Sayers, Gillespie and Paterson, 1986]. محاسبه این شاخص بر اساس پروفیل طولی اندازه‌گیری شده توسط پروفیل‌سنج و پس از آن اعمال فیلتر بر پروفیل می‌باشد. فیلتر میانگین متحرک^۲ با طول ۲۵۰ میلی‌متر یک روش برای هموار کردن پروفیل است که هر یک از نقاط واقع در نیمرخ با میانگین تعداد زیادی از نقاط مجاور آن جایگزین می‌شود [Sayers and Karamihas, 1998]. در ادامه با استفاده از یک مدل ریاضی به نام فیلتر ربع ماشین^۳، عبور یک خودرو سواری با مشخصات معین و سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت را شبیه سازی می‌کند و در نتیجه پس اعمال این فیلترها بر پروفیل، شاخص IRI محاسبه می‌گردد [ARA, 2004]. ناهمواری همبستگی زیادی با سطح لرزش وسیله نقلیه عبوری و بار دینامیکی ایجاد شده بر روی روسازی دارد، مطابق تحقیقات حرکت وسیله نقلیه در جاده‌های ناهموار باعث ایجاد ضربه و ارتعاش‌های ناخواسته در وسیله نقلیه شده و سلب آسایش کاربران می‌گردد [Sayers, Gillespie and Paterson, 1986]. شاخص‌های مختلفی در زمینه ارزیابی

۳-۱ دستگاه LCMS

دستگاه LCMS^۵ که مجهز به سیستم اندازه‌گیری لیزری ترک است، از پرتوافکن لیزری خطی و دوربین‌های سرعت بالا برای تولید پروفیل‌های عرضی و طولی سه‌بعدی سطح روسازی با فاصله طولی ۵ میلی‌متر، همچنین رزولوشن عرضی ۱ میلی‌متر و رزولوشن ارتفاعی ۰/۵ میلی‌متر استفاده می‌کند [Laurent, Savard and Lefebvre, 2014]. این پروفیل‌ها مبنای شناسایی خودکار خرابی‌های سطحی روسازی و ناهمواری می‌باشند. در واقع این دستگاه با ثبت دو مشخصه شدت لیزر^۶ و همچنین فاصله تا سطح روسازی^۷ و در نهایت ترکیب این دو ویژگی و ثبت تصاویر سه‌بعدی، قادر است خرابی‌های رایج سطح روسازی و ویژگی‌های آن نظیر ناهمواری، انواع ترک‌ها، شیارافتادگی، شن‌زدگی، چاله‌ها، خط‌کشی‌ها همچنین مشخصات هندسی را با دقت بالا، اندازه‌گیری کند. این دستگاه توانایی برداشت اطلاعات با سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت را دارد [Serigos and et al, 2016]. شکل ۱ نمایی از دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی از دستگاه LCMS

در نرم‌افزار تحلیل (LCMS Road Inspect)، داده‌های حاصل از برداشت، پردازش شده و داده‌های خروجی شامل اطلاعات کمی در قالب جداول و نمودارهایی از اندازه‌گیری‌های مربوط به هر کدام از خرابی‌ها و همچنین تصاویر سه‌بعدی از سطح روسازی بدست

استفاده شد. در رابطه مذکور عمق شیارافتادگی (میلی‌متر)، طول ترک خوردگی (متر در مساحت واحد نمونه)، مساحت چاله (مترمربع در مساحت واحد نمونه)، مساحت وصله (مترمربع در مساحت واحد نمونه) و سطح‌شن‌زدگی (مترمربع در مساحت واحد نمونه) می‌باشند. میزان ضریب همبستگی برای رابطه غیرخطی برابر ۰/۸ و برای رابطه خطی برابر ۰/۷۷ گزارش شد [Chandra, Sekhar and Bharti, 2013]. در یک تحقیق میدانی در کشور آمریکا، بررسی همبستگی شاخص وضعیت خرابی‌های سطحی PCI با شاخص ناهمواری روسازی منجر به توسعه مدلی جهت تعیین رابطه میان این دو شاخص شد. روابط ارائه شده برای شاخص‌های IRI و PCI برای آزادراه‌ها، راه‌های شریانی، راه‌های جمع‌کننده و راه‌های محلی بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی به ترتیب ۲۰، ۱۴۹، ۱۴۰، ۱۵۷ واحد نمونه بدست آمده است که ضرایب آماری مربوطه به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۷۱، ۰/۷۳ و ۰/۷۴ بدست آمده، از نتایج دیگر این تحقیق ارائه مدلی برای شاخص‌های IRI و PCI برای روسازی‌های آسفالتی، بتنی و مختلط بود. در مدل‌های اشاره شده ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۷۵ و ۰/۷۲ است. مدل‌های استخراج شده برای روسازی‌های آسفالتی، بتنی و مختلط بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی به ترتیب ۱۷۱، ۹۱، ۱۶۷ واحد به دست آمده است [Arhin, Williams and Ribbiso, 2015]. همچنین در سال ۲۰۱۳ ویدیا، سنتکومار و ماتیبو پژوهشی جهت تخمین شاخص IRI با استفاده از شاخص PCI با بهره‌گیری از مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی انجام دادند که نتایج آن بیانگر عملکرد قابل قبول شبکه عصبی و امکان پیش‌بینی IRI با ضریب R برابر با ۰/۸۶ بودند [Vidya, Santhakumar and Mathew, 2013].

۳. روش‌ها و ابزار

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

یک ساعت است [Laurent, Savard and Lefebvre, 2014]. در نهایت کلیه داده‌های حاصل از برداشت، در یک فایل اکسس ذخیره می‌شود. این فایل حاوی اطلاعات به صورت کمی در مورد اندازه‌گیری‌های مربوط به خرابی‌ها است. با پایان یافتن این مرحله، تمامی داده‌های مورد نیاز برای هر گونه تحلیل فراهم شدند. در این پژوهش در هر قطعه ۱۰ متری داده‌های خرابی‌های سطحی و شاخص بین‌المللی ناهمواری موجود می‌باشد که شامل ۱۹ پارامتر است و بدین ترتیب با توجه به طول ۵۲/۵۵ کیلومتری مقاطع ارزیابی شده تعداد کل قطعات ۱۰ متری ۵۲۵۵ و تعداد کل داده‌ها ۹۹۸۴۵ می‌باشد.

۴. تحلیل داده‌ها

۴-۱ جمع‌آوری داده‌ها

در راستای بررسی و تحلیل داده‌ها جهت رسیدن به اهداف پژوهش، مقاطعی از محورهای سطح کشور انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفتند که داده‌های خرابی‌های سطحی و ناهمواری توسط دستگاه LCMS آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی برداشت شدند. داده‌های پژوهش در دو مقطع زمانی و با فاصله ۲ سال برداشت شده است. در سال ۹۴ شاخص IRI از سطح روسازی و در سال ۹۶ شاخص IRI به همراه خرابی‌های سطحی به طور توأم اندازه‌گیری شدند. لیست مقاطع محورها که مطابق جدول ۱ می‌باشد.

بدین ترتیب بعد از برداشت ناهمواری و خرابی‌های سطحی روسازی با استفاده از دستگاه LCMS در محورهای شریانی کشور و همچنین پردازش اولیه خروجی‌های دستگاه برای استفاده و کاربردی شدن نیاز به پردازش ثانویه است. در نهایت خروجی آن، داده‌هایی مبتنی بر خرابی‌های سطحی روسازی و شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) است. گزارش‌گیری داده‌های خروجی دستگاه

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

می‌آیند [Sufi, Karimi and AbbasGhorbani, 2017]. نمایی از این نوع تصاویر در شکل ۲ نشان داده شده است. با پایان یافتن مرحله تحلیل اولیه، تمامی داده‌های مورد نیاز برای هر گونه تحلیل فراهم می‌شود.



شکل ۲. نمایی از تصاویر واقعی و پردازش شده دستگاه LCMS

۳-۲ روند و تنظیمات برداشت داده‌ها

در این پژوهش خرابی‌های سطحی روسازی و ناهمواری با استفاده از سیستم برداشت اتوماتیک LCMS برداشت شد. داده‌های برداشت شده با در طول کامل مسیر و عرض ۳/۷ متر برداشت شده است. در این دستگاه داده‌های برداشت شده به صورت فایل‌هایی از قطعات ۱۰ متری بر روی سیستم ذخیره می‌شوند. قطعات ۱۰ متری به صورت پیوسته برداشت شدند و بر خلاف روش سنتی که به صورت واحد نمونه برداشت می‌شود، تمام طول مقطع را پوشش می‌دهد که این موضوع می‌تواند وضعیت روسازی را به شکلی مناسب‌تر بیان کند. علاوه بر این، تصاویری نیز از سطح روسازی با فواصل ۱۰ متری ثبت می‌شوند. در نرم‌افزار تحلیل، داده‌های حاصل از برداشت پردازش شده و داده‌های خروجی شامل اطلاعات کمی در خصوص اندازه‌گیری‌های مربوط به هر کدام از خرابی‌ها و همچنین تصاویر سه‌بعدی از سطح روسازی بدست می‌آیند. داده‌های برداشت شده توسط دستگاه LCMS نیاز به آماده‌سازی اولیه دارد. زمان تقریبی مورد نیاز برای پردازش اولیه ۱۵ کیلومتر از مسیر راه توسط یک دستگاه رایانه نسبتاً قوی، حداقل

مقایسه آن‌ها با یکدیگر و کم کردن خطا بایستی داده‌ها نرمال سازی شود. برای استاندارد کردن یک داده باید آن داده را منهای میانگین کرده و بر انحراف معیار تقسیم نماییم. در اینجا برای نرمال کردن، عنصر مربوطه را منهای مینیمم کرده و بر دامنه تغییرات تقسیم نموده شد [Fakhri, Dezfoulian and Barzegaran, 2016]. در همین راستا تمام داده‌های این پژوهش با استفاده از روش فوق نرمال سازی شدند.

LCMS در قطعات ۱۰ متری انجام شد که پارامترهای خرابی سطحی و شاخص IRI حاصل از پردازش اولیه و نهایی در قطعات ۱۰ متری مطابق جدول ۲ به همراه واحدهای اندازه‌گیری ارائه شد.

۴-۲ استاندارد سازی و همبستگی پارامترها

با توجه به واحدهای متفاوت این پارامترها و شاخص‌ها و همچنین مقدار حدود و تغییرات آن‌ها جهت استاندارد کردن داده‌ها و امکان

جدول ۱. لیست مقاطع ارزیابی شده

ردیف	نام مقطع	کیلومتر از ابتدا	کیلومتر از انتها	طول مقطع
۱	حسن رود-کیاشهر	۱/۲۸	۶/۹۰	۵/۶۲
۲	اراک- خمین- گلپایگان	۴۳/۸۸	۶۰/۳۶	۱۶/۴۸
۳	عسلویه- کنگان- چغادک	۹۰/۰۳	۱۰۶/۴۰	۱۶/۳۷
۴	فیروزآباد-جم	۳۴/۶۳	۴۸/۷۱	۱۴/۰۸
	مجموع			۵۲/۵۵

جدول ۲. پارامترهای خروجی دستگاه LCMS

نام شاخص	پارامتر	واحد	نام شاخص	پارامتر	واحد
ناهمواری	IRI	m/km	مجموع ترک عرض	L_Trans	m
ناهمواری اولیه	IRI Initial	m/km	ترک عرض با شدت زیاد	L_TransHigh	m
میانگین عمق بافت	MTD	mm	ترک عرض با شدت متوسط	L_TransMed	m
عمق شیار افتادگی	Rut	mm	ترک عرض با شدت کم	L_TransLow	m
مساحت ناحیه شیار افتادگی	S_Rut	m ²	مجموع مساحت چاله‌ها	S_Pothole	m ²
مجموع ترک‌های طولی و عرضی	TransLong	m	طول واقعی ترک‌ها بر سطح قطعه	I_Cracks	m/ m ²
مجموع ترک طولی	L_Long	m	مساحت ترک‌های سطحی	S_AlgMlt	m ²
ترک طولی با شدت زیاد	L_LongHigh	m	درصد ترک‌های سطحی	P_AlgMlt	%
ترک طولی با شدت متوسط	L_LongMed	m	ترک طولی با شدت کم	L_LongLow	m
ترک طولی با شدت کم	L_LongLow	m			

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

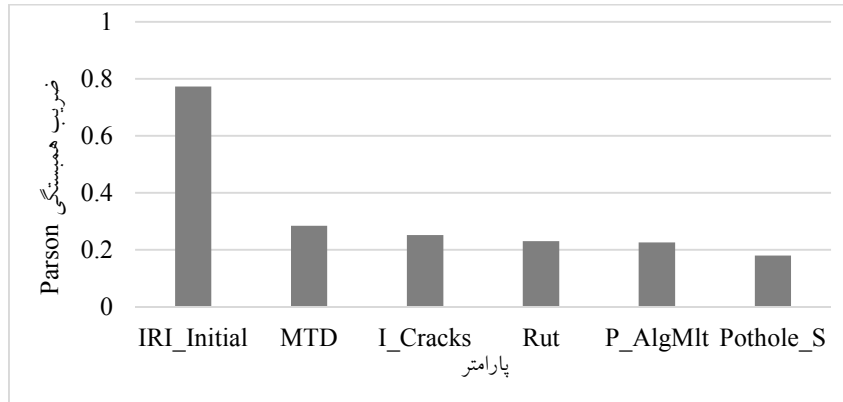
جدول ۳. همبستگی شاخص IRI با سایر پارامترها

IRI	IRI_Initial	MTD	Rut	Rut_S	I_Cracks	P_AlgtMlt	Pothole_S	TransLong
Pearson Correlation	0.773	0.284	0.231	0.012	0.251	0.226	0.180	0.215
Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.391	0.000	0.000	0.000	0.000
N	5255	5255	5255	5255	5255	5255	5255	5255
IRI	L_Long	L_LongHigh	L_LongMed	L_LongLow	L_Trans	L_TransHigh	L_TransMed	L_TransLow
Pearson Correlation	0.199	0.200	0.126	0.167	0.129	0.199	0.070	0.061
Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
N	5255	5255	5255	5255	5255	5255	5255	5255

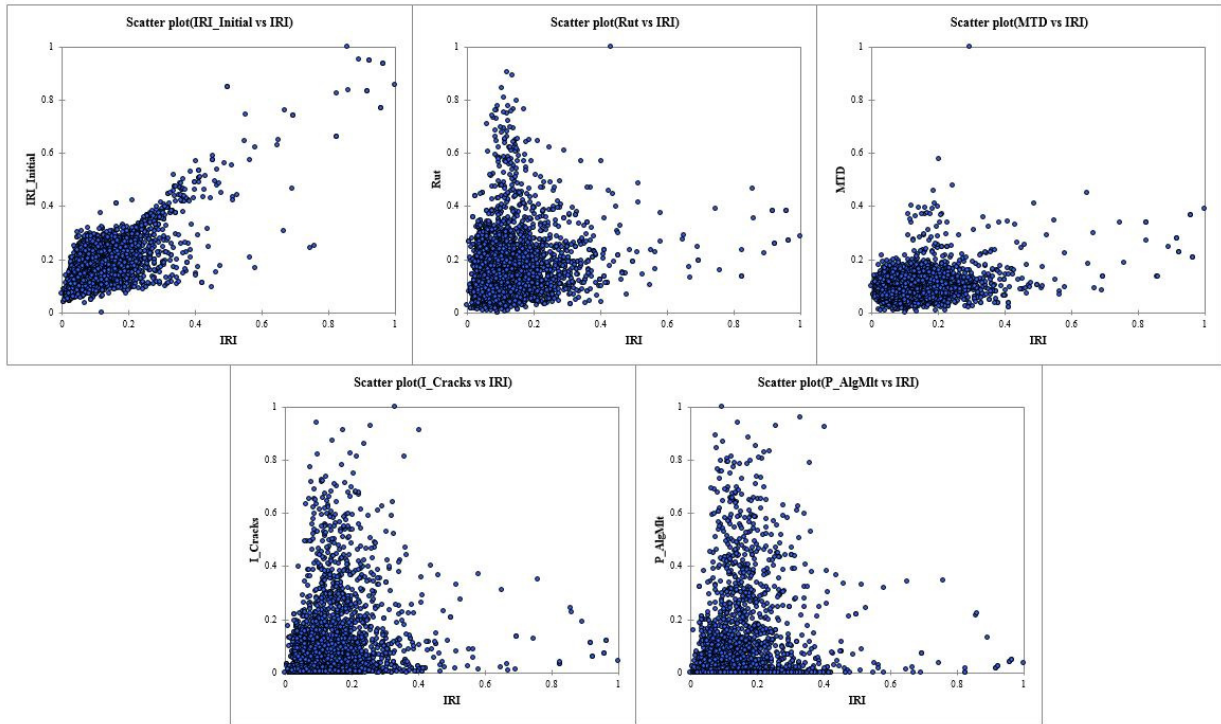
غیر خطی و یا تحلیل شبکه عصبی مشخص گردد. بدین منظور جهت یافتن استراتژی و فرم کلی معادله نمودار تغییرات IRI با پارامترهای مستقل مطابق شکل ۴ ترسیم شد. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود تعداد زیاد داده‌های پژوهش و روند تغییرات داده‌های مستقل نسبت به پارامتر وابسته و عدم امکان تشخیص فرم کلی تغییرات IRI به عنوان متغیر وابسته با سایر متغیرهای مستقل، انجام تحلیل و رگرسیون خطی یا غیرخطی را دشوار می‌کند و مدل‌های ساده‌تر پاسخگوی ایجاد رابطه همبستگی نیست. بنابراین با در نظر گرفتن موارد مطروحه و قابلیت‌های شبکه عصبی در یافتن روابط میان تعداد زیادی از متغیرها با حجم بالای نمونه داده‌ها [Ghasemzadeh and Jafarnejad, 2017] و همچنین روند تغییرات پیچیده، استفاده از این روش جهت رسیدن به بهترین نتایج و ارائه مدل با دقت بالاتر در دستور کار قرار گرفت. در همین راستا در نرم‌افزار MATLAB ادامه تحلیل‌ها برای روش شبکه عصبی انتخاب شد.

پس از مرحله استاندارد سازی داده‌ها، همه شاخص‌ها و پارامترهای اشاره شده در جدول ۲ بر رشد و تغییرات شاخص ناهمواری موثر نیست و این میزان تاثیر در هر یک از پارامترها متفاوت است. بر همین اساس با استفاده از نرم‌افزار SPSS و انجام تحلیل همبستگی^۱ میان تمام داده‌ها با IRI ماتریسی تشکیل شد. ماتریس همبستگی میان داده‌ها مطابق جدول ۳ می‌باشد. مقدار ضریب همبستگی هر چه بیشتر باشد نشان‌دهنده رابطه بیشتر دو پارامتر است. بدین ترتیب IRI به عنوان پارامتر هدف یا وابسته انتخاب شد و پارامترهای IRI_Initial، MTD، Rut، I_Cracks، P_AlgtMlt و Pothole_S به عنوان ورودی یا پارامتر مستقل تعیین گردید و ضرایب همبستگی Parson در شکل ۳ ارائه شده است. همچنین در جدول ۴ داده‌های آماری نظیر میانگین، میانه، واریانس، ماکزیمیم، مینیمم و... مربوط به همه پارامترهای ورودی و خروجی ارائه شده است.

برای برقراری روابطی با ضرایب همبستگی بالا توأم با استفاده از همه پارامترهای مستقل بایستی ابتدا فرم کلی تغییرات شناسایی شود تا استراتژی تحلیل اعم از تحلیل رگرسیون خطی، تحلیل رگرسیون



شکل ۳. ضرایب همبستگی Pearson



شکل ۴. تغییرات پارمتر وابسته نسبت به پارامترهای مستقل

جدول ۴. داده‌های آماری پارامترهای ورودی و خروجی

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Range
IRI	2.7851	0.0227	1.6432	2.7002	59.00	0.6360	1.8265	2.3865	3.2150	19.4015	18.7655
IRI_Initial	2.5519	0.0167	1.2072	1.4574	47.31	0.1700	1.8100	2.3100	2.9700	14.590	14.420

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

Rut	4.0362	0.0345	2.5001	6.2504	61.94	0.8050	2.4910	3.3140	4.8485	24.0125	23.2075
I_Cracks	0.6973	0.0149	1.0774	1.1608	154.52	0.000	0.0528	0.3961	0.7927	9.3459	9.3459
P_AlgtMlt	3.7840	0.1310	9.469	89.666	250.23	0.000	0.000	0.000	2.127	75.135	75.135
Pothole_Area	0.0020	0.0003	0.0182	0.0003	892.78	0.000	0.000	0.000	0.000	0.483	0.483
MTD	0.7373	0.0019	0.1437	0.0206	19.49	0.4593	0.6516	0.7098	0.80303	3.5153	3.0560

۴-۳ شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی (ANN⁹) مدل‌هایی محاسباتی هستند که رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم (هر چند پیچیده و غیرخطی) را با شبکه‌ای از گره‌ها که همگی به هم متصل‌اند، تعیین می‌کنند به عبارتی سیستم و روش محاسباتی نوین برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش و اعمال دانش به دست آمده جهت پیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از ساختارهای پیچیده است.

ساختار ANNs که معماری به آن اطلاق می‌شود، به شکلی است که نرون‌ها^{۱۱} در دسته‌هایی که لایه نام دارند، مرتب می‌شوند. معماری معمول ANNs متشکل از سه لایه کلی است، لایه ورودی (داده‌ها را در شبکه توزیع میکند)، لایه پنهان (داده‌ها را پردازش می‌کند) و لایه خروجی (نتایج را به ازای ورودی‌های مشخص، استخراج می‌کند). لازم به ذکر است در یک شبکه عصبی می‌تواند چندین لایه پنهان وجود داشته باشد [Nouri, Ashrafi and Ajdarpour, 2008].

۴-۳ ارائه همبستگی با شبکه عصبی مصنوعی

جهت ارائه یک مدل برای تبیین رابطه بین شاخص IRI و خرابی‌های سطحی روسازی با توجه به تعداد زیاد متغیرها و نمونه‌های این پژوهش از روش شبکه عصبی و نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. داده‌های ورودی^{۱۱} شبکه عصبی خرابی‌های سطحی (پارامترهای مستقل) می‌باشد و داده‌های هدف^{۱۲} شبکه عصبی شاخص ناهمواری (پارامتر وابسته) است. با وارد کردن

داده‌های مذکور در نرم‌افزار MATLAB و استفاده از ابزار Neural Net Fitting، تحلیل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی آغاز می‌گردد. برآزش شبکه عصبی مصنوعی این امکان را فراهم می‌کند تا داده‌ها انتخاب شوند، یک شبکه ساخته و آموزش داده شود و عملکرد آن با استفاده از میانگین مربع خطا (MSE) و تحلیل رگرسیون مورد ارزیابی قرار گیرد [Fakhri, Dezfoulan and Barzegaran, 2016].

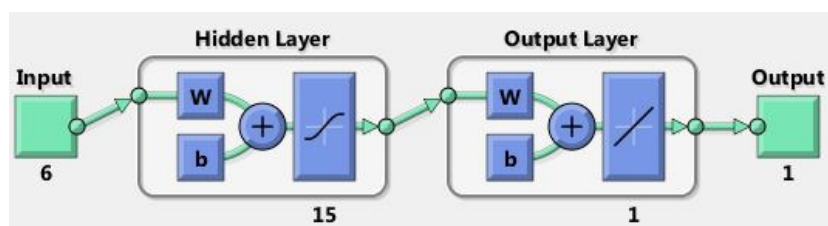
تنظیمات شبکه عصبی مصنوعی در همه گره‌ها ثابت ولی تعداد نرون‌ها در هر حالت متفاوت است. در شبکه عصبی ۷۰٪ داده‌ها جهت آموزش^{۱۳} شبکه عصبی اختصاص یافته‌اند که شبکه با توجه به خطای خود، اصلاح می‌گردد و با آن‌ها وزن‌های شبکه تعیین می‌شوند. در نظر گرفتن وزن متفاوت برای پارامترها ورودی، در فرآیند آموزش شبکه عصبی مصنوعی صورت می‌پذیرد، که این قابلیت به معنای توانایی تنظیم پارامترهای شبکه (وزن‌های سیناپتیکی) است [Zhang, 2002]. ۱۵٪ از داده‌ها به صحت‌سنجی^{۱۴} اختصاص یافته‌اند تا قابلیت تعمیم‌بخشی شبکه ارزیابی گردد و تا زمانی که بهبود در تعمیم شبکه متوقف شود، فرآیند آموزش نیز متوقف می‌گردد. ۱۵٪ بعدی به آزمایش^{۱۵} شبکه عصبی اختصاص می‌یابد که هیچ‌گونه تأثیری بر آموزش ندارد و یک اندازه‌گیری عملکرد شبکه در حین آموزش و پس از آن ارائه می‌کند. در حین آموزش تا زمانی که خطای مربوط به سری داده‌های نظارت کاهش یابد، آموزش ادامه می‌یابد. تعداد لایه‌های شبکه عصبی دو لایه می‌باشد و شبکه تحت الگوریتم لوبنبرگ-مارکوات^{۱۶} آموزش داده می‌شود. هنگامی که خطای مربوط به داده‌های

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

همراه و با استفاده از روابط تجربی انجام می‌پذیرد. برای اجرای همبستگی میان شاخص IRI و خرابی‌های سطحی در مقاطع مورد نظر از محورهای شریانی ایران، جهت تخمین شاخص بین‌المللی ناهمواری، شبکه عصبی مصنوعی اجرا شد. در این حالت شبکه عصبی مطابق ساختار کلی شکل ۵ می‌باشد. این شبکه متشکل از ۳ لایه است، لایه ورودی شبکه که شامل ۶ پارامتر IRI_Initial، P_AlgtI, Rut, MTD و S_Pothole است. لایه پنهان که شامل تعدادی نورون می‌باشد. با توجه به روابط تجربی و اجرای شبکه عصبی با تعداد متفاوت نورون‌ها (روش آزمون و خطا)، در این پژوهش تعداد نورون‌های بهینه شبکه عصبی، ۱۵ است و در نهایت لایه خروجی که شامل پارامتر هدف (شاخص IRI) می‌باشد.

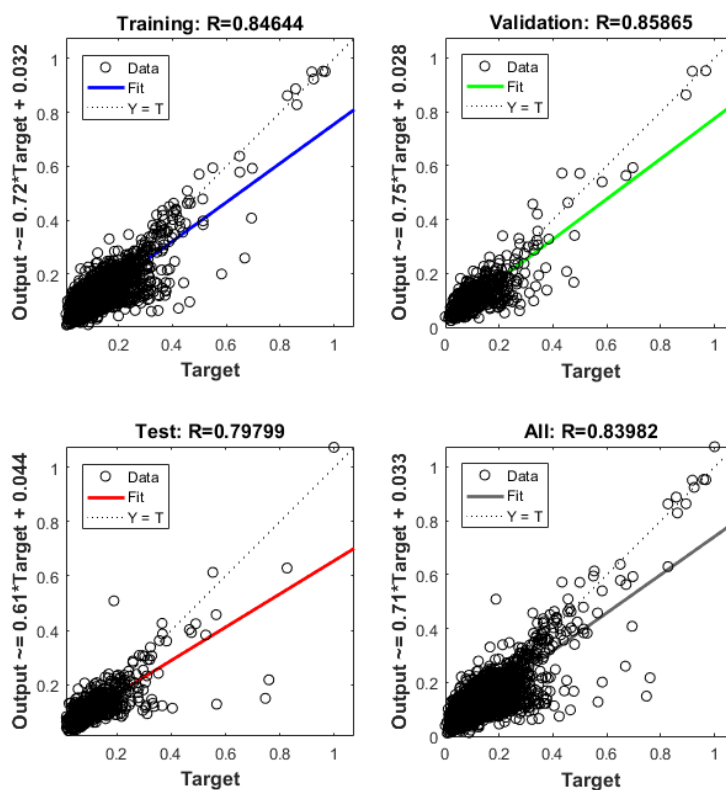
پس از اجرای شبکه عصبی مصنوعی، خروجی‌های آماری شبکه شامل ضریب همبستگی (R)، ضریب تعیین (R^2)، به ترتیب برابر ۰/۸۴ و ۰/۷۰ و میانگین مربعات خطا (MSE) شبکه برابر ۰/۰۰۲۲۷ می‌باشد. خروجی‌های مذکور در شکل ۶ و شکل ۷ ارائه شده است.

درستی‌یابی شروع به افزایش کند، آموزش متوقف می‌شود. با به کار بردن این روش، که روش توقف آموزش^{۱۷} نیز نامیده می‌شود، امکان استفاده از معماری‌های پیچیده‌تر در طراحی شبکه برای کاربر فراهم می‌شود، بدون اینکه مشکل فوق^{۱۸} برازشی روی دهد و با قرار دادن پارهای معیارها، به محض روی دادن این مشکل در شبکه، آموزش متوقف می‌شود. بدین ترتیب معیارهای مورد اشاره نقش مهمی در این روش ایفا می‌کنند. در یک شبکه عصبی مصنوعی چند لایه، تعداد لایه‌های میانی با درک پیچیدگی رابطه مستقیم دارند، اما تعداد زیاد این لایه منجر عدم همگرایی و نتیجتاً کاهش دقت پیش‌بینی شبکه خواهد شد. مطالعات گذشته نشان می‌دهد شبکه‌های عصبی با یک لایه پنهان در لایه میانی و تابع خطی در لایه خروجی قادر به تقریب تمامی توابع مورد نظر با هر درجه تقریب خواهد بود [Menhaj, 2005]. به هر حال کارهای نظری صورت گرفته در این زمینه نشان داده‌اند که یک لایه پنهان برای این گونه مدل‌ها می‌تواند هر تابع پیچیده و غیرخطی را تقریب زند. همچنین نتایج تجربی و عملی نیز این موضوع را تایید می‌کنند. در رابطه با تعداد نورون‌ها شبکه عصبی در لایه میانی هیچگونه رابطه مستندی وجود ندارد فقط تعدادی رابطه‌های تجربی در این زمینه پیشنهاد شده است و رسیدن به تعداد نورون‌های بهینه با روش آزمون و خطا به

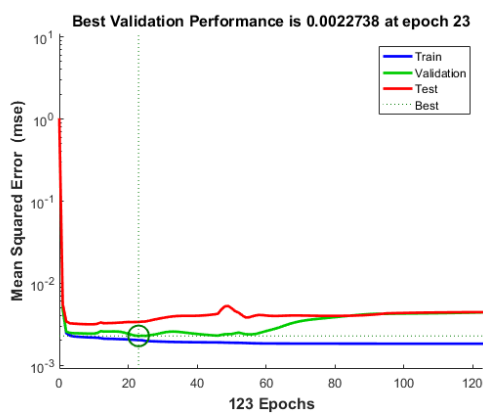


شکل ۵. ساختار کلی شبکه عصبی

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)



شکل ۶. خروجی شبکه عصبی



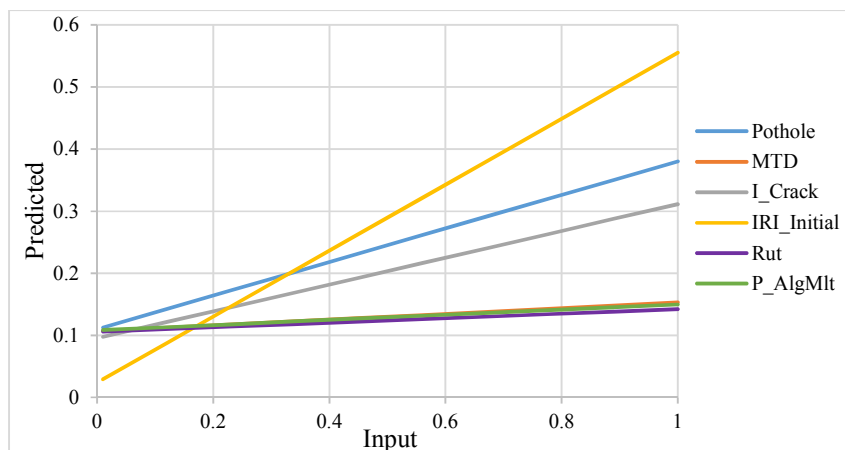
شکل ۷. خروجی شبکه عصبی

۳-۴ تحلیل حساسیت مدل

مدل است [Shafabakhsh, Mohammadi and Mirzanamadi, 2015]

لذا بدین منظور جهت شناخت تاثیر پارامترهای ورودی این پژوهش بر روی شاخص IRI، تحلیل حساسیت مدل ارائه شده انجام شد.

تحلیل حساسیت عبارتست از میزان تغییرات خروجی مدل به ازای تغییر معین در میزان ورودی‌های مدل که شامل وارد کردن محدوده ای از مقادیر برای ورودی‌ها و مشاهده تغییرات در مقادیر خروجی



شکل ۸. تحلیل حساسیت مدل ارائه شده

جدول ۵. تغییرات پارامترهای ورودی جهت تحلیل حساسیت

نام پارامتر	بازه تغییرات		شاخص IRI پیش‌بینی شده	
	از	تا	مقدار	نسبت
مقدار استاندارد	-	-	۰/۰۶	۱
Pothole	۰/۱	۱	۰/۳۲۹	۵/۵۱۹
MTD	۰/۱	۱	۰/۱۸۴	۳/۰۹۳
I_Crack	۰/۱	۱	۰/۲۹۸	۴/۹۹۸
IRI_Initial	۰/۱	۱	۰/۸۸۵	۱۴/۸۴۴
Rut	۰/۱	۱	۰/۰۶۱	۱/۰۲۳
P_AlzMlt	۰/۱	۱	۰/۰۶۷	۱/۱۲۶

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

تحلیل‌های انجام شده بر روی داده‌ها، نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل است:

۱- تمامی خرابی‌های روسازی که در آیین‌نامه‌ها از جمله ASTM- D6433 ذکر شده است در ناهمواری روسازی تاثیرگذار نیستند و میزان تاثیر آن‌ها متفاوت است. از میان داده‌های این پژوهش با تحلیل همبستگی و تشکیل ماتریس همبستگی مشخص شد پارامترهای نظیر ترک طولی و عرضی (ترک‌های خطی)، ترک‌های سطحی، مساحت چاله، شیارافتادگی، MTD و همچنین ناهمواری اولیه در نرخ رشد ناهمواری موثرتر هستند.

۲- به دلیل تعداد زیاد داده‌ها و پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق و روابط پیچیده و عدم تشخیص فرم کلی تغییرات داده‌ها نسبت به یکدیگر از میان روش‌های همبستگی موجود روش شبکه عصبی نسبت به رگرسیون خطی و غیرخطی مناسب‌تر است.

۳- در روش شبکه عصبی مصنوعی جهت همبستگی میان داده‌های شاخص بین‌المللی ناهمواری (IRI) و خرابی‌های سطحی در روسازی‌های آسفالتی ضرایب R و R^2 به ترتیب برابر $0/84$ و $0/70$ می‌باشد. همچنین میانگین مربعات خطا (MSE) در سطح قابل قبولی قرار دارد بطوریکه مقدار آن برابر $0/0227$ است.

۴- استفاده از مدل‌ها یک روش کم هزینه زیرا موجب کاهش فرکانس برداشت می‌شود و این کاهش، می‌تواند در صرفه‌جویی در منابع مالی موثر باشد. برای متولیان راه جهت تخمین شاخص ناهمواری و نرخ رشد ناهمواری بر اساس خرابی‌های سطحی جهت تصمیم‌گیری و اقدامات تعمیر و نگهداری در سطح شبکه قابل استفاده می‌باشد.

۵- با استفاده از روش تحلیل حساسیت، پارامترهای تاثیرگذار بر روی پیش‌بینی شاخص IRI شناسایی شد که بر این اساس شاخص ناهمواری اولیه (IRI_Initial)، خرابی چاله (Pothole) و خرابی ترک (I_Crack) به ترتیب بیشترین اثر و عمق بافت (MTD)،

بدین ترتیب ابتدا تعدادی از داده‌ها به عنوان داده شاهد برای آنالیز حساسیت انتخاب شد. بر همین اساس با تغییر در مقادیر یکی از پارامترها و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، پاسخ شبکه عصبی برای مقادیر شاخص IRI پیش‌بینی شده تعیین گردید. این مرحله برای تمامی پارامترهای ورودی مدل انجام شد که با تعیین مقدار پیش‌بینی شده می‌توان میزان حساسیت پارامترها را مشاهده نمود. به دلیل استاندارد سازی داده‌ها، همه پارامترها بدون بعد هستند و قابلیت مقایسه با یکدیگر را دارند. در نهایت با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر ورودی مدل نمودار ترسیم شد که در شکل ۸ ارائه شده است. همچنین تغییرات پارامتر خروجی بر اساس تغییر پارامتر ورودی از مقدار $0/1$ به 1 در جدول ۵ نشان داده شد. مطابق خروجی تحلیل حساسیت بر مبنای نسبت تغییرات مقدار شاخص IRI پیش‌بینی شده توسط مدل به تغییرات بازه پارامترهای ورودی، شاخص ناهمواری اولیه (IRI_Initial)، خرابی چاله (Pothole) و خرابی ترک (I_Crack) به ترتیب بیشترین تاثیر و عمق بافت (MTD)، درصد خرابی سطحی (P_Algt) و خرابی شیارافتادگی (Rut) به ترتیب کمترین تاثیر را بر روی مدل ارائه شده، می‌گذارد.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف شناخت تاثیر خرابیهای سطحی بر ناهمواری روسازی و ایجاد رابطه همبستگی میان نوع خرابیهای سطحی و ناهمواری روسازی جهت تخمین شاخص IRI و نرخ رشد ناهمواری انجام شد. به همین دلیل جهت کاهش خطاها از میان محورهای شریانی کشور با پراکندگی مناسبی انتخاب شد و به جای روش‌های سنتی، جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از ابزار دقیق اندازه‌گیری شد و پارامترهای مورد مطالعه با تکیه بر تکنولوژی جدید LCMS و با رزولوشن ۱ میلی‌متر برداشت شد. با توجه به

سطح جاده (LCMS)"، اولین کنفرانس ملی مهندسی راه و ترابری دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

- فخری، م. (۱۳۸۸) "حدود شاخص بین المللی ناهمواری (IRI) برای راه‌های ایران"، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری.

- فخری، م.، دزفولیان، ر. و بزرگران، ج. (۱۳۹۶) "ارائه گزینه مناسب نگهداری و بهسازی روسازی آسفالتی با بکارگیری شاخص‌های ارزیابی ناهمواری و خرابی سطحی"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره ۱۴، شماره ۴، ۲۱۱-۲۲۳.

- قاسم‌زاده، ح. و جعفر نژاد، م. (۱۳۹۶) "پیش بینی عملکرد روسازی با تلفیق مدل خانواده و شبکه عصبی (مطالعه موردی: معابر شهر ساری)"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۹، ویژه نامه روسازی، ۱-۱۲.

- نوری، ر.، اشرفی، خ. و اژدرپور، ا. (۱۳۸۷) "مقایسه کاربرد روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره براساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای پیش‌بینی غلظت میانگین روزانه کربن مونوکسید: بررسی موردی شهر تهران"، فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۴، شماره ۱۰، ۱۳۶-۱۵۱.

- Arhin, A., Williams, N., Ribbiso, A. and Anderson, F. (2015) "Predicting Pavement Condition Index Using International Roughness Index in a Dense Urban Area", Journal of Civil Engineering Research, Vol. 5, No.1, pp. 10-17.

- ARA, (2004) "Guide for Mechanisticempirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures", National Cooperative Highway Research Program.

درصد خرابی سطحی (P_Algt) و خرابی شیارافتادگی (Rut) به ترتیب کمترین اثر را دارد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. International Roughness Index
2. Moving Average
3. Quarter Car
4. Pavement Condition Index
5. Laser Cracking Measurement System
6. Intensity
7. Range
8. Correlation
9. Artificial Neural Network
10. Neurons
11. Inputs
12. Target
13. Training
14. Validation
15. Test
16. Levenberg-Marquardt
17. Training Stop Algorithm
18. Overfitting

۷. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۹۰) "آیین نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (تجدید نظر اول)"، تهران، ایران.

- شفابخش، غ.، محمدی، م.، میرزائمدی، ر. (۱۳۹۳) "تحلیل حساسیت عوامل تاثیرگذار بر رضایت عابرین از پیاده‌روی در تهران"، فصلنامه مهندسی ترافیک، دوره ۱۴، شماره ۵۶، ۵-۱۲.

- صوفی، س.، کریمی، م. و عباس قربانی، م. (۱۳۹۶) "ارزیابی خودکار خرابی‌های سطحی روسازی با استفاده از دستگاه اسکنر

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال دوازدهم / شماره سوم (۴۸) / بهار ۱۴۰۰

- Múčka, P. (2017) "International Roughness Index Specifications around the World", Road Materials and Pavement Design, Road Materials and Pavement Design, Vol. 18, No. 4, pp. 929-965.
- Park, K., Thomas, N. E. and WayneLee, K. (2007) "Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition", Journal of Transportation Engineering, Vol. 133, No. 7, pp. 706-709.
- Robinson, R., Danielson, U. and Snaith, M. (1998) "Road Maintenance Management-Concepts and System", Basingstoke: Macmillan.
- Robbins, M. and Tran, H. (2016) "A Synthesis Report: Value of Pavement Smoothness and Ride Quality to Roadway Users and the Impact of Pavement Roughness on Vehicle Operating Costs", National Center for Asphalt Technology (NCAT) at Auburn University, NCAT Report, 16-03.
- Sayers, M.W., Gillespie, T.D. and Paterson, W.D.O. (1986) "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements", Technical Paper No. 46, The World Bank. Washington, DC.
- Sayers, M.W. and Karamihas, S. M. (1998) "The Little Book of Profiling", Transportation Research Institute, University of Michigan, US.
- Schleppe, B.L. and Roberts, J.H. (2002) "Improving Rideability at a Newly Constructed Pavement Bridge Interface a Case Study", Journal of the Transportation Research Board, No. 186: 10-16M.
- Schram, S. and Abdelrahman, M. (2006) "Improving Prediction Accuracy in
- ASTM D6433-07, (2018) "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Chandra, S., Sekhar, C.R. and Bharti, A.K. (2013) "Relationship between Pavement Roughness and Distress Parameters for Indian Highways", Journal of Transportation Engineering, Vol. 139, No. 5, pp.731-739.
- Dewan, S. and Smith, R., (2002) "Estimating International Roughness Index from Pavement Distresses to Calculate Vehicle Operating Costs for the San Francisco Bay Area", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1816(1), pp. 65-72.
- Harrison, F. and Park, H. A. (2008) "Comparative Performance Measurement Pavement Smoothness-NCHRP 20-24(37B)", AASHTO.
- Hecht-Nielsen, R. (1987) "Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem", In Proceedings of the International Conference on Neural Networks, New York, IEEE Press, Vol. 3, pp. 11-14.
- Laurent, J., Savard, Y. and Lefebvre, D. (2014) "3D Laser Road Profiling for the Automated Survey of Road Surface Conditions and Geometry", IRF, 30.
- Mactutis, J. A., Sirous H. A. and Weston, C. O. (2000) "Investigation of relationship between roughness and pavement surface distress based on WesTrack project" Transportation Research Record, Vol. 1699, No. 1, TRB, National Research council, Washington, D.C., pp 107-113.

- Vidya, R., Santhakumar, S.M. and Mathew, S. (2013) "Estimation of IRI from PCI in Construction Work Zones", ACEE International Journal on Civil and Environmental Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 322-3310.

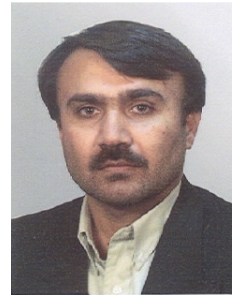
- Zhang, W.J. (2002) "An Artificial Neural Network Approach to Mechanism Kinematic Chain Isomorphism Identification, Mechanism and Machine Theory, pp. 549-551.

Mechanisticempirical Pavement Design Guide", Transportation Research Record, Vol. 1947 (Rigid and Flexible Pavement Design), No. 1, pp. 59-68.

- Serigos, P. A., Prozzi, J. A., Smit, A. F. and Murphy, M. R. (2016) "Evaluation of 3D Automated Systems for the Measurement of Pavement Surface Cracking", Journal of Transportation Engineering, Vol. 142, No. 6, 05016003.

تخمین ناهمواری روسازی بر اساس خرابی‌های سطحی با استفاده از شبکه عصبی (مطالعه موردی: محورهای شریانی ایران)

منصور فخری، درجه کارشناسی در رشته عمران-عمران را در سال ۱۳۷۰ و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-ژئوتکنیک در سال ۱۳۷۲ را از دانشگاه نیو ساوت ولز استرالیا اخذ نمود. در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران-راه و ترابری از دانشگاه نیو ساوت ولز استرالیا گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی، تکنولوژی قیر و آسفالت، تکنولوژی بتن، مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی راه و فرودگاه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است.



سیدمسعود کریمی، درجه کارشناسی در رشته عمران-عمران را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۷ را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی راه و فرودگاه و تکنولوژی قیر و آسفالت می‌باشد. در حال حاضر در شرکت مهندسی مشاور در زمینه تعمیر و نگهداری روسازی راه و فرودگاه در حال فعالیت است.



محمد رضا قربانی نیک، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. وی در حال حاضر دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت مدرس در رشته عمران-راه و ترابری است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت و تعمیر و نگهداری روسازی راه، مصالح دانه‌ای غیرچسبنده و تکنولوژی قیر و آسفالت می‌باشد.

