

## طراحی مدل سرعت وسایل نقلیه بر خرابی بحرانی روسازی انعطاف پذیر

### مقاله علمی - پژوهشی

مرتضی اویسی فر، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی بیرجند، بیرجند، ایران

محمد عابدینی\*، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی بیرجند، بیرجند، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: M.abedini@iaubir.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۲۱۲-۱۹۵

### چکیده

سرعت وسایل نقلیه می‌تواند بر عملکرد و خرابی روسازی تأثیرگذار باشد. دو معیار مهم در خرابی‌های ناشی از عبور بار در روسازی انعطاف‌پذیر، ترک‌های خستگی و شیارشدگی است. کرنش کششی زیر لایه رویه و کرنش فشاری روی خاک بستر در برابر خستگی و شیارشدگی به عوامل مختلفی مانند خصوصیات بارگذاری وسایل نقلیه نظیر سرعت و مقدار بار عبوری و فشار سطح تماس بستگی دارد. در این پژوهش از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای مدل پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسایل نقلیه استفاده شده است. در فرآیند استفاده از شبکه‌های عصبی، داده‌های شبکه عصبی ابتدا یک سری مقادیر تصادفی را به عنوان وزن‌ها و بایاس‌های اولیه شبکه انتخاب می‌کند و این یکی از معایب آن است. در این راستا از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی وزن شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای پیاده‌سازی ساده‌تر است و می‌تواند نقطه بهینه را به سرعت پیدا کند. با توجه به نتایج در سرعت‌های پایین وسایل نقلیه، احتمال وجود خرابی‌های خستگی، شیارشدگی و افت و خیز روسازی بیشتر می‌شود و هرچه سرعت وسیله نقلیه کمتر شود، تعداد تکرار بار منجر به خرابی نیز کاهش می‌یابد و افزایش سرعت باعث می‌شود که خرابی در روسازی کمتر شود.

واژه‌های کلیدی: سرعت وسایل نقلیه، خرابی بحرانی، روسازی انعطاف‌پذیر، شبکه عصبی-فازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام

ذرات

### ۱-مقدمه

روش برای محدودکردن شیار افتادگی در روش مکانیستیک-تجربی طرح روسازی بیان می‌شود. اولین روش محدود کردن کرنش‌های فشاری عمودی در بالای بستر روسازی و دومین روش محدودکردن کل تغییر شکل‌های جمعی ماندگار سطح روسازی بر پایه ویژگی‌های تغییر شکل ماندگار هر لایه به صورت مجزا می‌باشد. ترک‌های مربوط به خستگی به تعداد زیاد در رویه‌های آسفالتی دیده می‌شوند. پدیده خستگی عبارت است از پدیده شکست بر اثر تکرار بار، تغییر و تناوب دینامیکی بارکه معمولاً کمتر از مقاومت نهایی

امروزه در بسیاری از کشورها، شیارافتادگی و خستگی به عنوان یکی از مهم‌ترین خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر شناخته شده است، به طوری که تحقیقات در کشورهای اروپایی به منظور تعیین خرابی‌های رایج روسازی آسفالتی، نشان داد که شیارافتادگی و خستگی در لایه‌های آسفالتی رایج‌ترین خرابی در سطح راه‌های اروپا می‌باشد (Chompoorat et al., 2018). عامل شیار افتادگی عموماً در اثر تکرار عبور بارهای بیش از توان روسازی است و در نتیجه لایه رویه دچار یک تغییر شکل پلاستیک و برگشت‌ناپذیر می‌شود. به طور کلی دو

با روش‌های خطی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و دارای نتایج بهتری در مقایسه با آن‌ها بوده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های هوش مصنوعی دارای قابلیت بالایی در فرآیند پیش‌بینی می‌باشند. روش ANFIS یکی از مهم‌ترین و کاراترین روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی است. روش مذکور ترکیبی از قوانین مربوط به شبکه‌های عصبی و منطق فازی می‌باشد. در این روش از منطق فازی برای بهبود عملکرد شبکه عصبی با اضافه کردن مفهوم عدم قطعیت به شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. در مقالات مختلف این روش به کرات مورد استفاده قرار گرفته است لذا استفاده از این روش می‌تواند منجر به بالا رفتن دقت پیش‌بینی گردد. علاوه بر این به منظور افزایش سرعت و دقت الگوریتم از ترکیب آن با الگوریتم PSO استفاده گردید (Kim et al., 2008). در این پژوهش سعی بر آن شد تا با استفاده از مدل ترکیبی (هیبریدی) روش سیستم استنتاجی فازی - عصبی تطبیقی و الگوریتم PSO به پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسایل نقلیه پرداخته شد، که این مطلب نشان دهنده جنبه نوآوری پژوهش است. مرور پژوهش‌ها نشان داد تاکنون از روش هیبریدی مذکور به منظور پیش‌بینی در این حوزه استفاده نشده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

هرناندز و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی تحت عنوان «روش‌های تحلیلی برای تحلیل ۳ بعدی تماس تایر با سطح روسازی» به بررسی تأثیر ابعاد تایر کامیون‌ها بر سطح روسازی پرداختند (Hernandez et al., 2014). در این مقاله نمای سه بعدی لاستیک با روسازی در کامیون‌ها با نسل جدید تایرها عریض و لاستیک‌های دوپل اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شد، در این آزمایش مقدار باد تایرها برای فشار معمولی و شدید (۷۹،۶۲،۴۴،۳۵،۲۶ کیلو نیوتن) در نظر گرفته شد. مقدار تنش در حرکت اندازه‌گیری و مقادیر پیک در سه جهت مقایسه شد و اهمیت تنش تماسی با مقطع مشخص گردید، علاوه بر این، تغییرات ویژگی‌های اندازه‌گیری در طول، عرض و ارتفاع شناسایی شدند، و یک تابع بسته به دو پارامتر رگرسیون بار اعمال شد و فاصله در امتداد طول تماسی برای نشان دادن بار تماسی در دو جهت عمودی و عرضی پیشنهاد گردید. تجزیه و

استاتیکی آسفالت باشد. مقاومت در برابر خستگی یک مخلوط آسفالتی، توانمندی مخلوط در مقابل بارهای خمشی تکراری است (Hafez et al., 2018). ترک‌های ناشی از خستگی در روسازی‌ها عموماً در اثر تغییرات شرایط محیطی خصوصاً تغییرات دمایی و تکرار بار وسایل نقلیه به وجود می‌آیند. این ترک‌ها را می‌توان به سه گروه دسته‌بندی کرد: ترک‌های طولی، ترک‌های عرضی و پوست سوسماری. گسترش این ترک‌ها در سه مرحله انجام می‌شود: مرحله اول مرحله آغاز ترک است و ترک‌های ریز در اثر تمرکز تنش در رویه ایجاد می‌شوند. در مرحله دوم، ترک‌های ریزی که در مرحله اول ایجاد شده‌اند، شروع به گسترش می‌کنند و ترک‌های بزرگ‌تر تشکیل می‌شوند و در مرحله سوم شکست روسازی اتفاق می‌افتد، از این رو نیاز به بررسی و استفاده از علوم مختلف مانند علم رایانه‌ای در صنعت راه‌سازی جهت بررسی رفتار روسازی تحت اثر وزن وارده، سرعت بار متحرک در شرایط دمایی مختلف در صنعت راه‌سازی و به ویژه روسازی‌های آسفالتی برای بهبود عملکرد و بهینه‌سازی اقتصادی، احساس می‌شود (Huang, 2004).

یکی از فاکتورهای مهم در طراحی روسازی انعطاف‌پذیر خرابی است که عدم شناخت کافی از عوامل ایجاد آن باعث گسترش خرابی و در نهایت شکست و انهدام کامل روسازی می‌شود. این امر باعث صرف هزینه‌های اضافی برای تعمیر و نگهداری راه می‌باشد و کاملاً غیر اقتصادی است (Keymanesh et al., 2016).

با توجه به بررسی پیشینه تحقیق و به دلیل پیچیدگی پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر و حجم بالای اطلاعات مورد پردازش، اغلب استفاده از یک سیستم ساده برای پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر نتایج خوبی به همراه ندارد. به همین دلیل محققان با ارائه مدل‌های ترکیبی سعی در ارائه سیستمی با پیچیدگی کمتر و کارایی و دقت بیشتر کرده‌اند. امروزه از الگوهای مختلفی مانند: تکنیک‌های آماری (تحلیل تشخیصی، لوجیت و آنالیز فاکتوری) و تکنیک‌های هوش مصنوعی (شبکه‌های عصبی، درخت تصمیم‌گیری برای پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر استفاده می‌شود (Khabiri, 2010). تعدد روش‌های هوش مصنوعی استفاده شده و همچنین تنوع این روش‌ها و نیز با در نظر گرفتن این نکته که در اکثر پژوهش‌های بررسی شده، روش‌های هوش مصنوعی

گنورگلی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی تحت عنوان «چرخ خودروهای خودران: تأثیر ساختاری بر روسازی‌های انعطاف‌پذیر» به بررسی خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر پرداختند (Georgouli et al., 2021). وسایل نقلیه خودران، از جمله کامیون‌ها، در حال حاضر در دسترس هستند و پذیرش آن‌ها با سرعت زیادی در حال انجام است. علیرغم این واقعیت که این فناوری جدید حمل و نقل بر روی زیرساخت روسازی موجود حرکت می‌کند، مطالعه و بررسی تأثیر ساختاری AVها بر روسازی‌ها به سطح توجه و بلوغ مشابه سایر حوزه‌های تحقیقاتی مرتبط نرسیده است. با توجه به سرمایه‌گذاری گسترده در ساخت و نگهداری روسازی، ضرورت درک کامل این اثرات در دراز مدت آشکار می‌شود. مقاله حاضر تحقیقات و یافته‌های مرتبط در حال حاضر منتشر شده را در مورد کمیت تأثیر بالقوه چرخ خودران، چه منفی و چه مثبت، ارائه و مورد بحث قرار می‌دهد، و زمینه‌های بالقوه بینش‌گری آینده را برای کمک به شکل‌دهی به تحقیقات آینده برای این زمینه نوظهور ارائه می‌دهد. این مقاله بر روی تأثیر چرخش جانبی چرخ‌های AVs بر روی طراحی جدید روسازی انعطاف‌پذیر و تجمع آسیب در سازه‌های روسازی انعطاف‌پذیر موجود تمرکز دارد با توجه به نتایج که چرخ‌های جانبی صفر AVs در مقایسه با وسایل نقلیه کنونی (غیر خودگردان) که تمایل به پیروی از توزیع چرخ‌های جانبی نرمال دارند، تأثیر ساختاری منفی قابل تعریف بر روی سازه‌های روسازی انعطاف‌پذیر دارد. با این حال، تحت شرایط خاص تعریف شده (توزیع بهینه سرگردان چرخ)، عمر سرویس روسازی را می‌توان به طور بالقوه افزایش داد. ایزا و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی تحت عنوان «پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی با استفاده از رویکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی» به بررسی خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر پرداختند (Issa et al., 2022). شاخص وضعیت روسازی یک ارزیابی عددی از شرایط روسازی بر اساس آسیب‌های موجود است. مقادیر شاخص وضعیت روسازی برای مدیریت روسازی و برنامه‌های بهسازی استفاده می‌شود. محاسبه شاخص وضعیت روسازی با استفاده از روش مرسوم متکی بر جمع‌آوری داده‌های میدانی مربوط (مانند انواع پریشانی و شدت) با روش بازرسی بصری است. داده‌های جمع‌آوری شده برای تخمین مقادیر شاخص وضعیت روسازی پردازش می‌شوند، که یک

تحلیل بر روی اندازه‌گیری‌هایی برای بدست آوردن پارامترهای رگرسیون انجام شد و یک روشی ساده برای تعیین بارهای تماسی تایر و آسفالت پیشنهاد گردید. پائولی و همکاران (۲۰۱۵) در مقاله‌ای تحت عنوان «تأثیر ابعاد تایر بر عملکرد یک جاده با حجم کم در معرض بارهای سنگین» به بررسی تأثیر ابعاد تایرهای مختلف از وسایل نقلیه سنگین در عملکرد جاده انجام شده و جاده سایت بر روی یک سطح نازک آسفالت با ضخامت کل لایه‌ها در حدود نیم متر که سطح روسازی بر روی بستر گل و لای وجود داشت، اندازه‌گیری با دو بار محوری ۸۰ کیلونیوتن و ۱۰۰ کیلونیوتن که از انحراف سطح جاده و تنش عمودی در سه عمق زیر سطح بدست آمد، نشان داد که تنش در داخل ساختار جاده تا ۳۰٪ بالاتر بود زمانی که انواع لاستیک باریک تک بجای لاستیک دوپل نرمال مورد استفاده قرار گرفت و این بدان معناست که عمر جاده تا سه برابر با توجه به نوع لاستیک متغیر است (Pauli et al., 2015). القادی و همکاران (۲۰۱۶) در مقاله‌ای تحت عنوان «تأثیر لاستیک‌های عریض بر سیستم روسازی انعطاف‌پذیر» به بررسی پاسخ بدست آمده از ساخت مدل معتبر المان محدود در نسل جدید لاستیک‌های پهن و باز و لاستیک‌های دوپل دو تایر معمولی در روسازی ارائه شده است (Al-Qadi et al., 2016)؛ از ویژگی‌های این مدل المان محدود که مورد استفاده قرار گرفته است، نیروهای سه بعدی تماسی، تحلیل دینامیکی و مواد پایه ناهمسان غیرخطی است که در تجزیه و تحلیل روسازی انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده است، ورودی‌ها به مدل شبیه سازی و طیف وسیعی از سناریوها نشان داد که واکنش‌های روسازی در لاستیک‌های پهن و باز به طور مداوم بالاتر از لاستیک‌های دو تایر معمولی می‌باشد و تفاوت کاهش ضخامت روسازی افزایش یافته می‌یابد. تفاوت تغییرات درصد میانگین مقاومت کششی طولی (ضخامت لایه روسازی از ۲۲۵ تا ۱۰۱۲٫۵ میلی متر) در پایین لایه آسفالت بتنی به ترتیب ۱۴٫۷ و ۲۳٫۲٪ برای ضخامت ضعیف و نازک می‌باشد. در حالت‌های خیلی کمی تنش برشی عمودی در زیر اساسی روسازی نازک برای لاستیک‌های دوپل نازک بزرگ‌تر از لاستیک‌های پهن و باز می‌باشد، در پاسخ مشابه با توجه به تغییر ضخامت متوسط درصد تفاوت ۴٫۴٪ بود. اگر کشش آسفالت در حالت بحرانی به‌عنوان وسیله انتقال عوامل تأثیرگذار بر عمر روسازی استفاده شود.

می‌شود. شاخص‌های عملکرد متعدد نشان می‌دهند که رویکردهای جنگل تصادفی از نظر دقت و شناسایی متغیرهای تأثیرگذار از سایر مدل‌ها پیشی می‌گیرد. نتایج حاصل از مطالعه نشان می‌دهد که پارامترهای مهم طراحی که تأثیر قابل توجهی بر شیار، زبری و ترک‌خوردگی دارند. بار ترافیکی، عمر روسازی و عوامل محیطی (بارش و دما) عوامل حیاتی هستند و تأثیر بسزایی بر عملکرد روسازی دارند. این مطالعه ایده جدیدی از استفاده از روش‌های آماری برای تجزیه و تحلیل اثرات عوامل سازه‌ای و بارگذاری بر روسازی‌های انعطاف‌پذیر ارائه می‌دهد.

هنانده و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی تحت عنوان «معرفی مدل‌سازی ریاضی برای برآورد شاخص کیفیت روسازی روسازی‌های منعطف بر اساس الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی» به بررسی خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر پرداختند (Hanandeh, 2022). این مطالعه نتایج استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای ارزیابی شاخص کیفیت روسازی در جاده اصلی با تجزیه و تحلیل ۵۰۰ بخش روسازی انعطاف‌پذیر بررسی کردند. مقاطع روسازی در مناطقی انتخاب می‌شوند که در معرض متغیرهای زیادی مانند ترافیک، مصالح روسازی و مناطق مختلف آب و هوایی قرار دارند. فرسودگی روسازی توسط تعدادی از عوامل، از جمله بار تک محوری معادل تجمعی، ساختار روسازی و خواص مواد تعیین می‌شود. هدف این مطالعه توسعه یک مدل عملکرد PQI بر اساس استفاده از رتبه‌بندی سطح، رتبه‌بندی سرویس‌پذیری فعلی و عمر روسازی است. چندین تکنیک برای پیشنهاد مدل PQI استفاده شد، مانند رگرسیون خطی چندگانه، الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی. رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که سرویس‌پذیری فعلی و SR تنها بر PQI تأثیر معنی‌داری داشتند ( $P = 0/0001$ ). با این حال، عمر روسازی در PQI کمتر معنادار است ( $p = 0,506$ ). الگوریتم ژنتیک و تکنیک‌های شبکه عصبی مصنوعی برای پیشنهاد دو مدل PQI با مقدار R2 به ترتیب برای مدل آموزشی ۰,۹۸ و ۰,۹۴ استفاده شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که مدل الگوریتم ژنتیک بهتر از شبکه عصبی عمل می‌کند.

فرآیند طولانی است که به تجربه فنی نیاز دارد. هدف این تحقیق مدل‌سازی رابطه بین نوع و شدت پریشانی و شاخص وضعیت روسازی از طریق مدل مستقیم و انطباقی است. بنابراین، از قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقادیر شاخص وضعیت روسازی بخش‌های مختلف استفاده می‌شود، بنابراین تلاش‌ها و تجربیات فنی لازم برای تخمین مقادیر شاخص وضعیت روسازی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی امکان معرفی متغیرهای محلی جدید مانند وجود منهول‌ها در بخش‌های روسازی را فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که همبستگی کم بین پریشانی‌ها و شاخص وضعیت روسازی وجود دارد، که در آن بالاترین همبستگی مطلق بین شاخص وضعیت روسازی و هر نوع و شدت پریشانی از ۰,۳۸ تجاوز نمی‌کند. نتایج نشان داد که مدل ANN قادر به پیش‌بینی شاخص وضعیت روسازی با سطح اطمینان بالا برای آموزش، اعتبار سنجی و آزمایش مجموعه داده‌ها است. بندری (۲۰۲۲) در پژوهشی تحت عنوان «درک اثرات عوامل سازه‌ای و بار ترافیکی بر عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر» به بررسی خرابی روسازی‌های انعطاف‌پذیر پرداختند (Bhandari et al., 2022). آسیب روسازی با بارهای وسایل نقلیه به سرعت افزایش می‌یابد. خرابی روسازی‌ها در طول زمان ناشی از عوامل مختلفی است، اما بار ترافیکی نقش مهمی در مصرف عمر روسازی دارد. بارهای وسایل نقلیه سنگین، علاوه بر ظرفیت ساختاری ناکافی روسازی‌ها، یکی از عوامل اصلی شرایط نامناسب جاده‌ها هستند. ترک خوردگی، شیار شدن و ناهمواری از جمله انواع مختلف خرابی هستند که معیارهای عملکردی شرایط جاده هستند و تمرکز اصلی این مطالعه است. بنابراین، به منظور بهبود درک خرابی بحرانی روسازی، این مقاله تأثیر عوامل مختلف ساختاری، بار ترافیکی و شرایط محیطی را بر عملکرد روسازی ارزیابی می‌کند. در این مطالعه، نوع پایه، ضخامت لایه بتن مخلوط آسفالت گرم، ضخامت لایه پایه، بار ترافیکی، عمر و شرایط محیطی (بارش و دما) به عنوان عوامل اصلی کمک کننده برای تحلیل عملکرد روسازی انتخاب می‌شوند. مدل‌های رگرسیون لجستیک باینری، و رویکردهای جنگل تصادفی برای ارزیابی داده‌های برنامه عملکرد بلندمدت روسازی استفاده می‌شوند. روش اعتبارسنجی متقاطع برای مقایسه اثربخشی مدل‌های رگرسیون با رویکردهای جنگل تصادفی استفاده

### ۳- پیش‌بینی خرابی‌های روسازی انعطاف‌پذیر

میزان خرابی‌های سطح روسازی جاده‌ها باتوجه به عمر روسازی به یک یا چند عامل بستگی دارد: روش طراحی، بار ترافیک، دانه‌بندی مصالح، درجه‌بندی راه و عوامل محیطی و غیره. در این بخش به بررسی مدل‌های قابل دسترس برای تجزیه و تحلیل سازه روسازی پرداخته می‌شود. این مدل‌ها برآوردهایی در مورد عملکرد سازه روسازی از لحاظ تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌ها (به صورت ارتجاعی و دائمی)، ارائه می‌دهد و هدف آن ارائه مدل‌هایی برای تخمین عملکرد روسازی و واکنش‌های مربوطه می‌باشد. معمولاً یک سازه روسازی از سه لایه تشکیل شده است. لایه آسفالتی، لایه اساس یا زیراساس و در انتها لایه ساب‌گرید. هر کدام از این لایه‌ها یک مدل خرابی مخصوص به خود دارند و مدل خرابی برای هر لایه با پاسخ بحرانی در یک موقعیت خاص در زیر بار ارتباط دارد (Rith et al., 2018).

با وجود اینکه انواع تنش‌های مختلف در یک روسازی وجود دارد، هنر طراحی به پیش‌بینی چند نوع تنش محدود می‌شود. ترک خوردگی ناشی از تکرار بار (خستگی) - تغییر شکل دائمی ناشی از بار (خط افتادن - شیار افتادن) - ترک خوردگی نزدیک سطح (بالا به پایین). در ایالات متحده گزارش شده است که رایج‌ترین تنش‌های مخرب در روسازی‌های آسفالتی ناشی از ترک‌خوردگی‌های

(۱)

$N_f$ : تعداد تکرار مجاز خستگی

$E$ : سختی مصالح بر حسب psi

$\epsilon_t$ : کرنش کششی بحرانی زیر لایه آسفالت

$h_{ac}$ : ضخامت لایه آسفالتی بر حسب اینچ

$V_a$ : درصد فضای خالی آسفالت (در این مقاله ۱ درصد گرفته شده است)

$V_b$ : مقدار قیر موثر در آسفالت (در این مقاله ۵ درصد گرفته شده است)

و همچنین  $C = 10^M$ ،  $M = 4.84 \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$  و  $k = \frac{1}{0.000298 + \frac{0.002802}{1 + e^{(11.02 - 2.49 \cdot h_{ac})}}}$  می‌باشند.

### ۳-۲- شیارشدگی بستر

خرابی شیارشدگی در اثر تغییر شکل لایه بستر یکی از انواع خرابی‌هایی است که در راه‌های موجود در کشور به‌وجود می‌آید. در این خرابی نشست یا تغییر شکل بستر روسازی باعث تشکیل شیارشدگی در محل عبور چرخ می‌شود. کرنش فشاری روی لایه بستر یک عامل تعیین کننده در تعداد تکرار

حاصل از خستگی می‌باشد و تحقیقات قابل ملاحظه‌ای انجام شد تا چنین ترک‌خوردگی‌هایی را به حداقل برساند. در ایران نیز در بسیاری از راه‌های ترانزیتی در کشور خرابی ترک‌های خستگی مخصوصاً در مناطق سردسیر و شیارشدگی دیده می‌شود (Subhy, 2017). در این مقاله مدل‌های خرابی روسازی که به آن‌ها توابع انتقال نیز گفته می‌شود برای ایجاد رابطه بین پاسخ‌های روسازی (تنش و کرنش) با تعداد مجاز تکرار بار قبل از خرابی استفاده می‌شود.

### ۳-۱- ترک خستگی

خرابی خستگی لایه آسفالتی معمولاً در اثر تنش کششی ایجاد می‌شود، در این حالت ترک اولیه در زیر لایه آسفالتی ایجاد و در کل لایه پخش می‌شود. این نوع ترک‌ها تحت عنوان ترک‌های خستگی پایین به بالا شناخته شده‌اند و یکی از عوامل اصلی خرابی لایه آسفالتی می‌باشد. تنش کششی در زیر لایه آسفالتی در اثر تغییر شکل آسفالتی و عدم حمایت لازم از لایه‌های زیرین اتفاق می‌افتد. در روسازی‌های با ضخامت بالا معمولاً تنش کششی زیر لایه دیگر بحرانی نیست و تنش برشی لایه رویه بحرانی می‌شود (Khabiri, 2010). پیشنهاد سیستم مکانستیک-تجربی آشتو در روش طراحی روسازی برای تعیین تعداد تکرار بار منجر به خستگی از روابط ذیل می‌باشد که در این مقاله از رابطه زیر استفاده شده است.

$$N_f = 0.00432 \cdot k \cdot C \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.9492} \cdot \left( \frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

منجر به خرابی شیارشدگی ثانویه به حساب می‌آید. از این رو با محاسبه کرنش فشاری بیشینه قائم روی لایه بستر و با استفاده از تابع انتقال می‌توان تعداد تکرار این خرابی را پیش‌بینی کرد.

$$N_p = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_p^{-4.477}) \quad (2)$$

$N_p$ : تعداد تکرار منجر به خرابی شیارشدگی بستر

$\epsilon_p$ : کرنش قائم فشاری روی بستر

### شبکه ANFIS

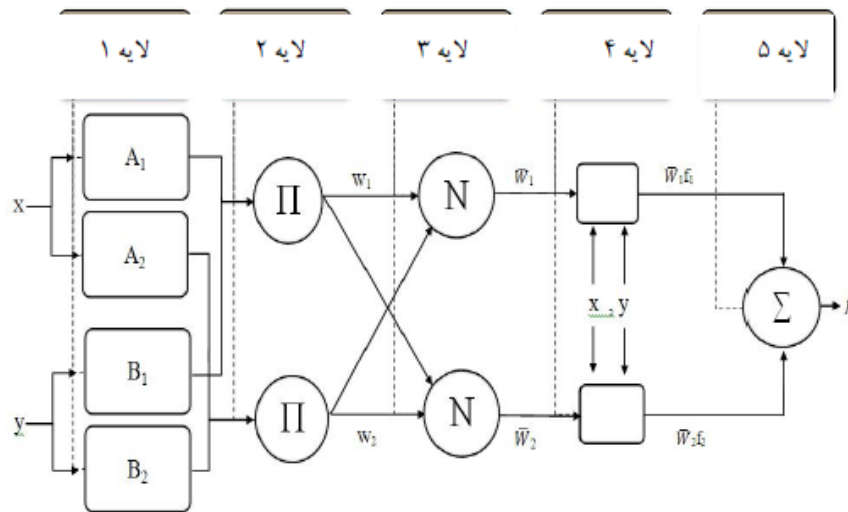
"اگر-آنگاه" فازی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل است برطرف می‌گردد. معمول‌ترین نوع سیستم استنتاج فازی که قابلیت قرارگیری در یک شبکه تطبیقی را دارد، سیستم فازی تاکاگی-سوگنو است که خروجی آن یک رابطه خطی است و پارامترهای آن را می‌توان با ترکیب روش‌های حداقل مربعات خطا و انتشار خطا به عقب، بر اساس کاهش گرادیان، به دست آورد. شکل (۱) یک شبکه عصبی - فازی سوگنو با دو ورودی  $x$  و  $y$  و یک خروجی  $f$  را برای چهار قانون نشان می‌دهد. همچنین برای دو ورودی قواعد اگر و آنگاه فازی سوگنو به صورت زیر قواعد ۱ تعریف می‌شوند.

مدل‌های فازی-عصبی توسط جونگ در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت. وی برای تسهیل فرآیند یادگیری و انطباق، منطق فازی را با شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیب کرد (منهاج، ۱۳۹۳). در واقع در مدل‌های فازی-عصبی برای حل مشکل شناسایی پارامترهای سیستم استنتاج فازی از یک شبکه تطبیقی که حالت عمومی شبکه عصبی پیشرو چندلایه را دارد، استفاده می‌کنند (Javidi & Roshan, 2013). یک شبکه تطبیقی، ساختار پیشرو چندلایه‌ای است که رفتار کلی خروجی آن به وسیله مقدار یک مجموعه از پارامترهای قابل اصلاح تعیین می‌گردد. با استفاده از این شبکه عصبی تطبیقی، مشکل اصلی استفاده از سیستم استنتاج فازی که همان به دست آوردن قواعد

**Rule 1:** *if (x is  $A_1$ ) and (y is  $B_1$ ) Then ( $f = p_1x + q_1y + r_1$ )* (۱)

**Rule 2:** *if (x is  $A_2$ ) and (y is  $B_2$ ) Then ( $f = p_2x + q_2y + r_2$ )*

شکل (۱) مدل ANFIS براساس دو ورودی و یک خروجی نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایش مدل ANFIS با دو ورودی و یک خروجی

### الگوریتم PSO

به دینامیک مدل حساس نیست پارامترهای ناشناخته مدل را با مینیمم‌سازی یک تابع هزینه مناسب مشخص می‌کند. این تکنیک رفتار اجتماعی ذراتی که در یک فضای جستجوی

الگوریتم PSO که توسط کندی و ابرهارت در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید یک روش برای بهینه‌سازی سیستم‌های غیرخطی هست (منهاج، ۱۳۹۳). این الگوریتم به دلیل اینکه به‌طور کامل

جواب بالقوه در فضای D بعدی به فرم رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$x_1 = (x_{1_1}, x_{1_2}, \dots, x_{1_D})$$

بدست آمده توسط همسایگی‌های آن ذره در جمعیت محاسبه می‌گردد. بنابراین بروزکردن سرعت و موقعیت ذره با معادله (۳) محاسبه می‌گردد.

$$v_i = w \cdot v_{i-1} + c_1 \cdot r_1 \cdot (x_{i_{gbest}} - x_i) + c_2 \cdot r_2 \cdot (x_{i_{pbest}} - x_i)$$

$$x_{i+1} = x_i + v_i$$

محلی و سراسری تعادل ایجاد نماید. وزن جبری به‌طور خطی از ۰.۹ تا ۰.۴ در طی فرآیند بهینه‌سازی کاهش می‌یابد.

چندبعدی حرکت می‌کنند را شبیه‌سازی می‌کند. ذرات موقعیت و سطح برازندگی خود را در هر تکرار با توجه به تابع هدف ارزیابی می‌کنند. در الگوریتم PSO، i امین ذره  $x_i$  بعنوان (۲)

تغییرات موقعیت هر ذره از یک تکرار به تکرار دیگر مطابق با فاصله بین موقعیت فعلی و بهترین موقعیت قبل آن ذره و همچنین فاصله بین موقعیت فعلی ذره و بهترین موقعیت

که در آن مقادیر  $c_1$  و  $c_2$  را ۲ قرار می‌دهند. به منظور کاهش تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به جواب بهینه، وزن جبری (W) مناسب باید انتخاب گردد تا بین جستجوی

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم

پارامترها	توضیحات
W	وزن جبری
$v_i$	سرعت ذرات
$c_i$	ثابت‌های شتاب‌دهی که ذره $x_i$ را به طرف $x_{i_{gbest}}$ حرکت می‌دهد
$r_i$	مقادیر تصادفی در بازه (Chompoorat et al., 2018)
$x_i$	تغییرات موقعیت هر ذره از یک تکرار به تکرار دیگر
$x_{i_{gbest}}$	بهترین ذره بین همسایگی‌های آن ذره در جمعیت
$x_{i_{pbest}}$	بهترین موقعیت بدست آمده توسط ذره $x_i$
$w_{max}$	بیشترین مقدار وزن جبری در طی فرآیند برای یافتن وزن جبری مناسب
$w_{min}$	کمترین مقدار وزن جبری در طی فرآیند برای یافتن وزن جبری مناسب
$iter_{max}$	ماکزیمم تعداد تکرارها
$iter$	تعداد تکرارهای کنونی

### ترکیب شبکه عصبی-فازی با الگوریتم بهینه ازدحام ذرات

گردیده است تا مسئله شناسایی و ایجاد ساختار بهینه‌ی شبکه عصبی توسط الگوریتم بهینه ازدحام ذرات انجام شود.

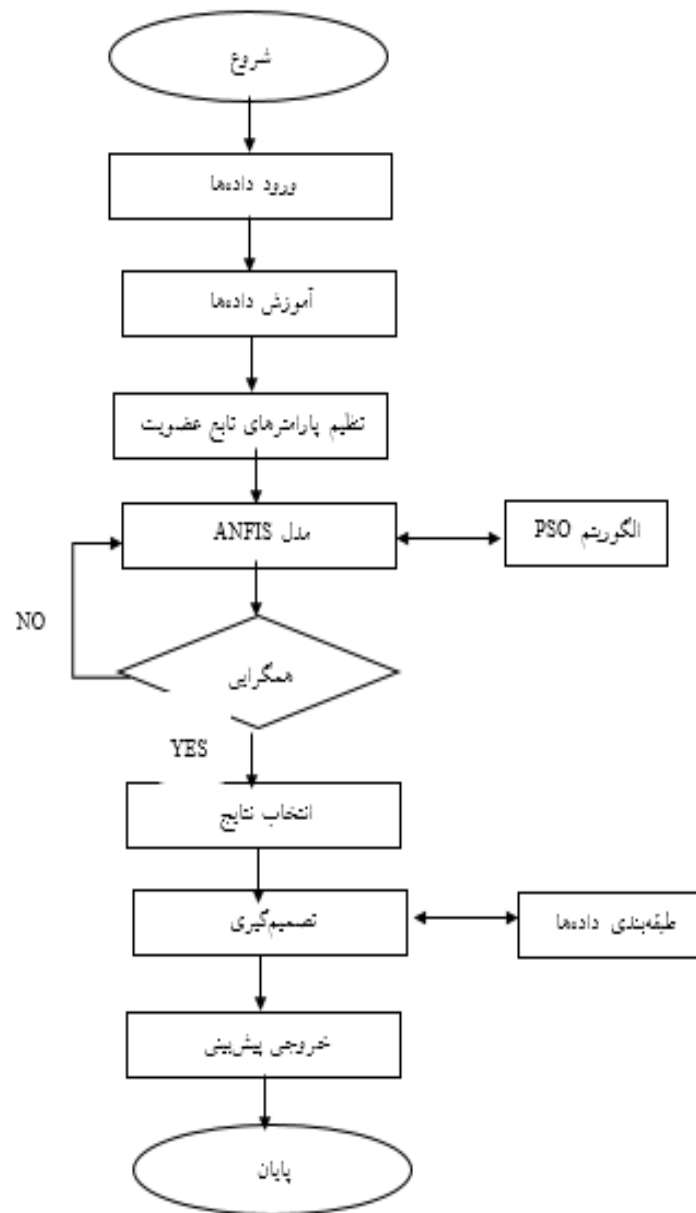
#### طراحی مدل پیش‌بینی

در مدل پیشنهادی، فرآیند مربوط به ساختن سیستم استنتاج فازی (FIS) به شرح زیر می‌باشد: ابتدا متغیرهای مستقل به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شوند. به ازای هر یک از ورودی‌ها، فرآیند فازی‌سازی انجام می‌شود، به عبارتی ابتدا توابع عضویت برای هر یک از متغیرها تعریف می‌گردد. سپس

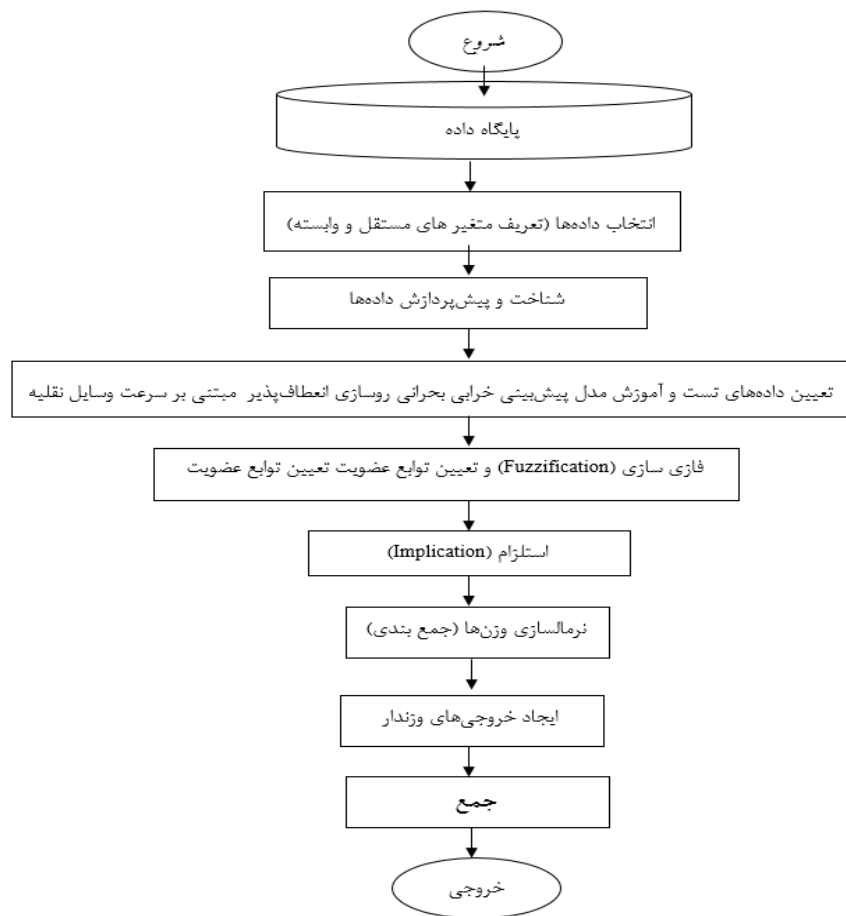
شناسایی و ایجاد یک ساختار مناسب برای سیستم‌های عصبی-فازی قبل از شروع آموزش آن توسط شبکه عصبی، امری ضروری بوده و در دستیابی به نتایج نهایی بسیار اثرگذار است. ایجاد یک ساختار مناسب برای سیستم عصبی-فازی تا حد زیادی به سلیقه و تجربه محقق بستگی دارد. در مواقعی ممکن است ساختار ایجادشده، چندان بهینه نبوده و امکان بهره‌مندی از ساختارهای بهتر از آن وجود داشته باشد. از اینرو در این مطالعه از ترکیب الگوریتم بهینه ازدحام ذرات و سیستم عصبی-فازی که فلوچارت آن در شکل (۲) رسم شده استفاده

محاسبه شده برای هر یک از قوانین فازی با استفاده از S نرم ماکسیمم ترکیب می‌گردند. که خروجی آن یک مجموعه فازی می‌باشد (مرحله جمع بندی). در نهایت فرآیند نافازی‌سازی انجام شده و یک خروجی به ما می‌دهد (شکل ۲). پس از بحث خلاصه در مورد فرآیند سیستم استنتاج فازی (FIS) به بررسی نحوه ترکیب انفیس می‌پردازیم. در مدل کلی انفیس، با توجه به داده‌ها یک FIS پایه با استفاده از روش خوشه‌بندی فازی FCM ایجاد می‌گردد. سپس در فرآیند طراحی مدل، داده‌های آموزش و سیستم FIS آموزش داده می‌شوند و در نهایت مدل نهایی ایجاد می‌شود. در این فرآیند از دو روش کلاسیک آموزش‌های شبکه عصبی مثلاً پس انتشار خطا استفاده می‌گردد. در این حالت معیار بهینه‌سازی معیار خطای مدل‌سازی می‌باشد. در فرآیند انفیس تعداد قواعد فازی برابر با تعداد خوشه‌های محاسبه شده در FCM می‌باشد.

با توجه به داده‌ها قواعد فازی طراحی می‌گردد. در ادامه برای هر یک از قواعد با استفاده از استلزام سوگونو (مینیمم و ضرب ممدانی) و ترکیب بخش‌های مختلف آن قاعده فازی یک وزن محاسبه می‌گردد. شایان ذکر است به دلیل راحتی و دقت قابل قبول استلزام ممدانی، از این روش در الگوریتم انفیس به منظور بررسی درجه صحت قانون فازی استفاده می‌شود و مرحله مذکور فرآیند استلزام نام دارد. در واقع در مدل نهایی، مقادیر ورودی مشخص بوده و مقدار خروجی مشخص نیست. در این حالت با توجه به مقادیر ورودی و قرار دادن آن در توابع عضویت مربوط به پیش‌شرط‌های قواعد فازی یک پارامتر محاسبه شده و این پارامتر در تابع عضویت خروجی (مقدار دقیق خروجی مشخص نیست) با استفاده از استلزام ممدانی ضرب شده و در نهایت یک تابع عضویت مجزا برای هر یک از قوانین فازی مشخص می‌گردد. در مرحله بعد توابع عضویت



شکل ۲. ترکیب شبکه عصبی فازی با الگوریتم بهینه ازدحام ذرات



شکل ۳. فلوچارت مدل تشخیص نقص نرم‌افزار

بهترین مقادیر پارامترها به عنوان خروجی نهایی حاصل می‌گردد. با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای و جلساتی که با خبرگان و کارشناسان مربوطه صورت گرفت، مهم‌ترین متغیرهای مستقل موثر شامل ۳ متغیر (سرعت وسیله نقلیه، مدول الاستیسیته، ضخامت رویه) و متغیرهای خروجی (کرنش کششی زیر لایه، کرنش فشاری روی بستر) تعیین گردید. سپس داده‌های مدل جمع‌آوری گردید. در ادامه با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده مدل هوشمند پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه طراحی گردید.

به منظور بهینه سازی با انفیس در فرآیند آموزش انفیس تمرکز بر روی تغییر و تعیین بهینه پارامترهای مربوط به قواعد فازی مدل می‌باشد. در قواعد فازی توابع عضویت گوسین می‌باشند و پارامترهای مربوط به توابع گوسین (اعداد مربوط به انحراف معیار و میانگین مربوط به هر تابع عضویت گوسین) تغییر کرده و تابع خطای مدل‌سازی بهینه می‌گردد. در واقع به منظور بهینه ساختن مدل انفیس، پارامترهای مربوط به توابع عضویت مربوط به فرآیند ساختن FIS به پارامترهای سیستم فازی پایه با توجه به تابع خطای مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم انفیس تنظیم می‌گردد. و در نهایت سیستم فازی دارای

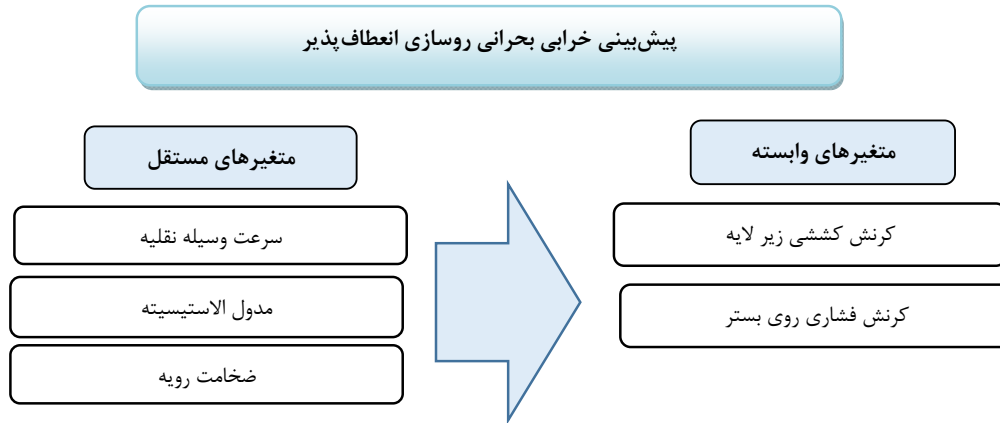
### نرمال سازی داده‌های ورودی

در روش پیشنهادی، ابتدا به پیش‌پردازش داده‌ها پرداخته می‌شود به این‌صورت که مقادیر ویژگی‌ها بین صفر و یک

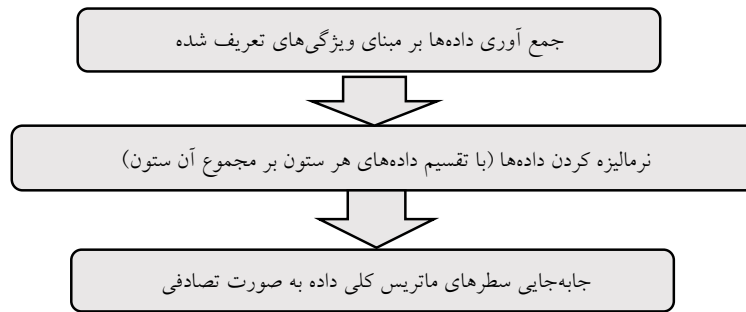
با استفاده از تابع زیر نرمالیزه گردیده‌اند. داده‌های آموزش و تست را نیز از هم تفکیک می‌نماید. جهت ارزیابی روش

مورد بررسی دارای سه پارامتر ورودی و دو متغیر خروجی (کرنش کششی زیر لایه، کرنش فشاری روی بستر) می‌باشد.

پیشنهادی، از بین تعداد رکوردهای جمع‌آوری شده، ۷۰ درصد اولیه داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد داده‌ها برای تست آزمون و ۱۵ درصد داده‌ها جهت اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. دیتای



شکل ۴. مدل پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه



شکل ۵. پیش‌پردازش داده‌ها

مقدار واقعی،  $x_{min}$ ،  $x_{max}$ : حداقل و حداکثر داده‌ها هستند.

طبق بررسی‌های انجام شده بهتر است استاندارد سازی داده‌ها بین دو عدد ۰ و ۱ صورت گیرد.

با استفاده از رابطه (۴) داده‌های ورودی به شبکه ANFIS نرمال شدند، که در این رابطه  $x_i$ : مقدار استاندارد شده،  $x$ :

$$x_i = \left( \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) \quad (۴)$$

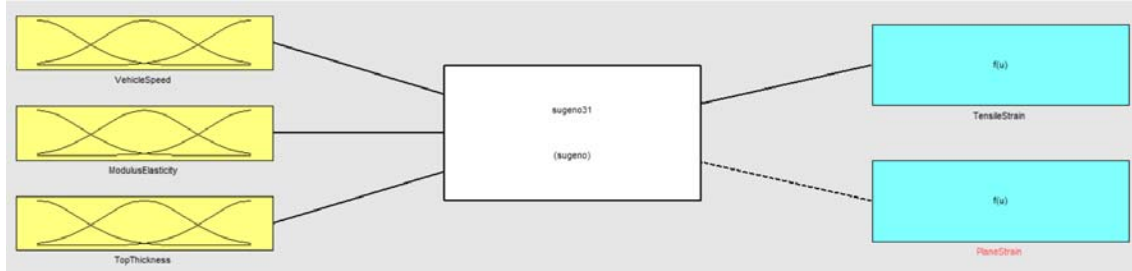
طراحی مدل پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه با ANFIS-PSO

میانگین مربعات خطا و جذر آن است. خروجی در غالب سه نمودار و میانگین درصد خطا بیان می‌گردد. در روش پیشنهادی

در این بخش پس از تعریف و پیش‌پردازش، داده‌های مورد نظر به سیستم مذکور داده شده. خروجی سیستم بر مبنای روش

و متغیرهای کرنش کششی زیر لایه، کرنش فشاری روی بستر به عنوان متغیر خروجی مدل می‌باشد. داده‌های ورودی به صورت اعداد فازی (مرحله فازی‌سازی) تبدیل می‌گردند.

داده‌های ورودی به دو دسته آموزش و تست تقسیم شدند. در طراحی مدل شبکه ترکیبی، متغیرهای ورودی عبارتند از ۳ متغیر (سرعت وسیله نقلیه، مدول الاستیسیته، ضخامت رویه)

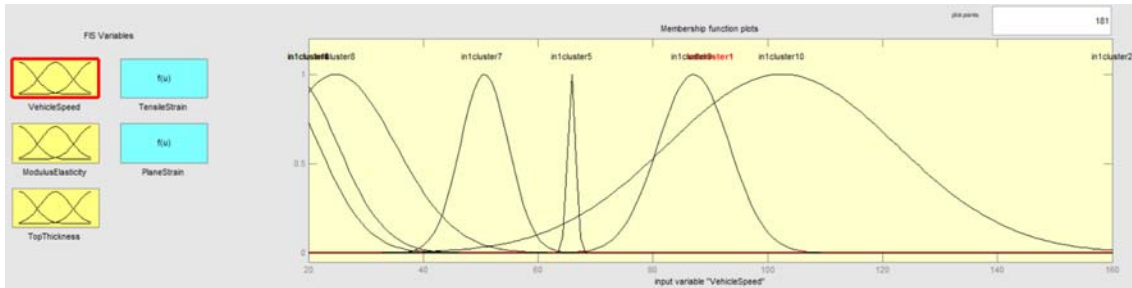


شکل ۶. مدل پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه در محیط متلب

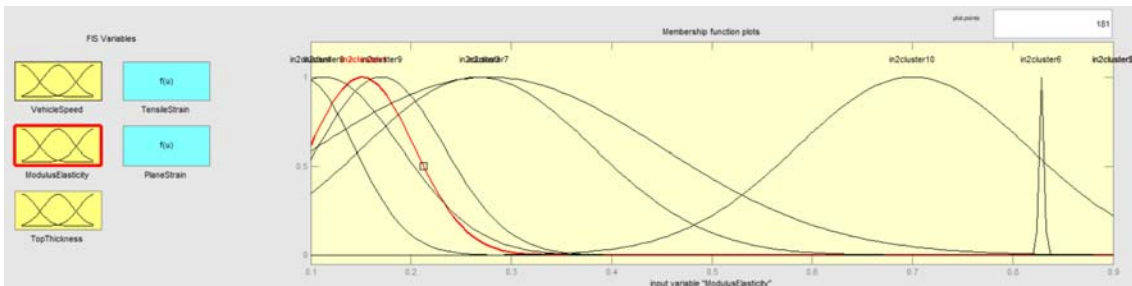
داده‌ها این متغیر در ۱۰ خوشه در بازه‌های متفاوت در ده خوشه تشکیل گردید.

به طور مشابه توابع عضویت مربوط به متغیر مدول الاستیسیته در بازه ۰ تا ۱ درصد با توابع گوسین و در ۱۰ خوشه در بازه‌های متفاوت در پنج خوشه تشکیل گردید.

به منظور طراحی مدل سیستم استنتاج فازی (FIS) پایه برای داده‌های آموزش طراحی می‌گردد، که در ادامه توابع عضویت مربوط به FIS پایه تشکیل گردید. در این راستا توابع عضویت مربوط به متغیر سرعت وسیله نقلیه در بازه ۰ تا ۱ با توابع گوسین و با استفاده از روش خوشه‌بندی FCM بر مبنای

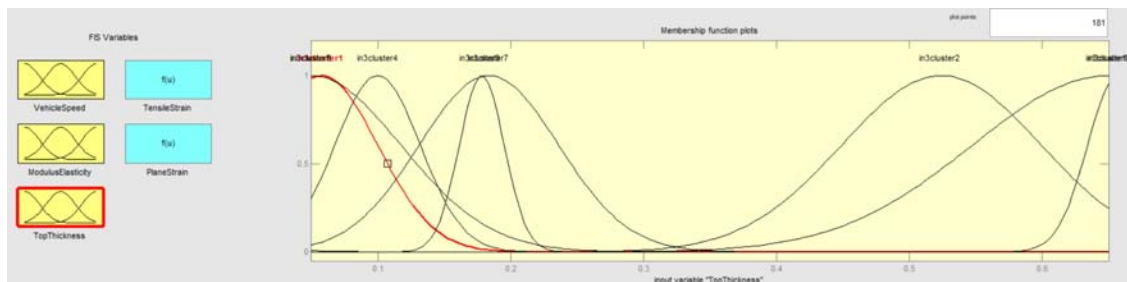


شکل ۷. توابع عضویت مربوط به متغیر سرعت وسیله نقلیه مربوط به FIS پایه



شکل ۸. توابع عضویت مربوط به متغیر مدول الاستیسیته مربوط به FIS پایه

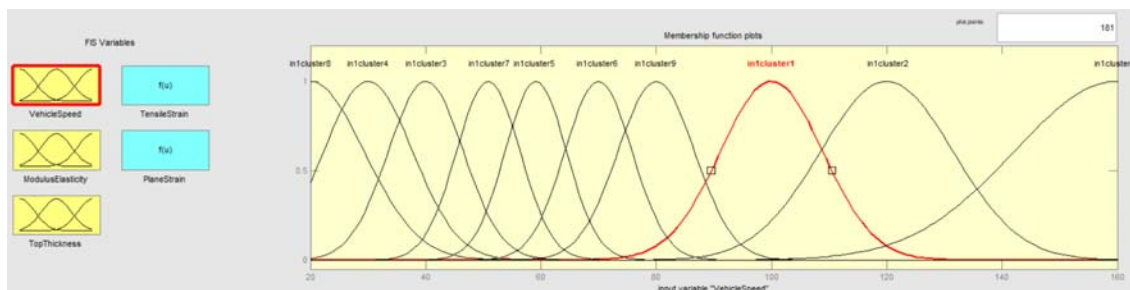
توابع عضویت مربوط متغیر ضخامت رویه در بازه ۰ تا ۱ با توابع گوسین و روش FCM این متغیر در ۱۰ خوشه در بازه‌های متفاوت در ده خوشه تشکیل گردید.



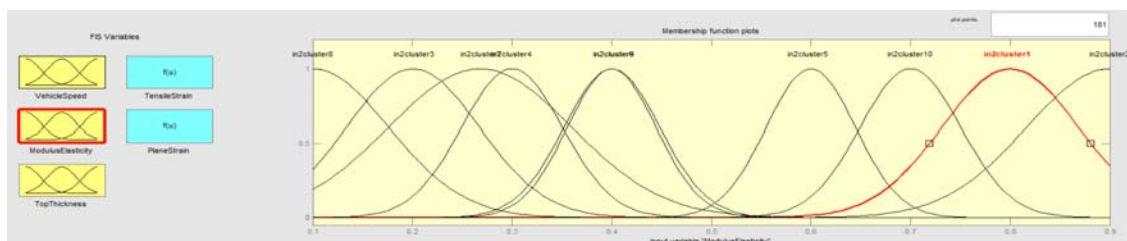
شکل ۹. توابع عضویت مربوط به متغیر ضخامت رویه مربوط به FIS پایه

به هر یک از متغیرها را به عنوان خروجی می‌دهد. توابع عضویت بهینه روش PSO مربوط به هر یک از متغیرها به ازای همان ۱۰ خوشه محاسبه و تشکیل گردید.

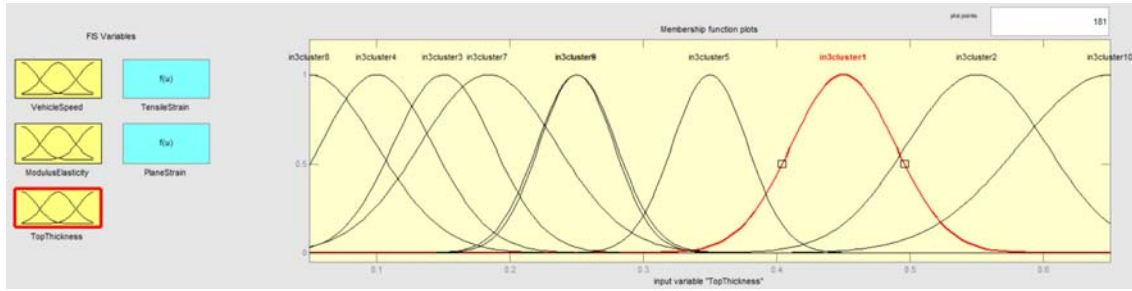
در ادامه به منظور به تنظیم پارامترهای سیستم فازی پایه با توجه به تابع خطای مدل‌سازی از الگوریتم بهینه سازی PSO استفاده شد. در واقع ورودی الگوریتم فازی پارامترهای مربوط به توابع عضویت FIS پایه می‌باشد. الگوریتم PSO با استفاده از تابع هزینه خطای مدل‌سازی اجرا و در نهایت بهینه‌ترین مقادیر توابع عضویت مربوط



شکل ۱۰. توابع عضویت مربوط به متغیر سرعت وسیله نقلیه مربوط به FIS بهینه

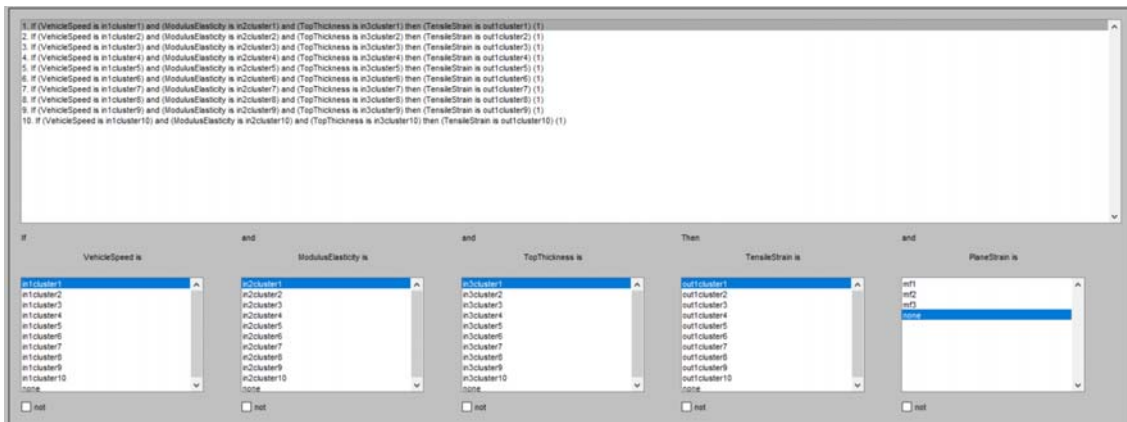


شکل ۱۱. توابع عضویت مربوط به متغیر سرعت مدول الاستیسیته مربوط به FIS پایه



شکل ۱۲. توابع عضویت مربوط به متغیر ضخامت روبه مربوط به FIS پایه

سپس قواعد فازی مدل بهینه در ۱۰ قاعده فازی تعیین گردید.



شکل ۱۳. قواعد فازی مدل پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه

(۳ ورودی) به آن وارد می‌گردد، سپس به ازای ورودی‌های فازی‌سازی انجام می‌شود، به عبارتی توابع عضویت برای این متغیرها تعریف گردید. در ادامه استلزام یا ۱۰ قاعده فازی تشکیل گردید.

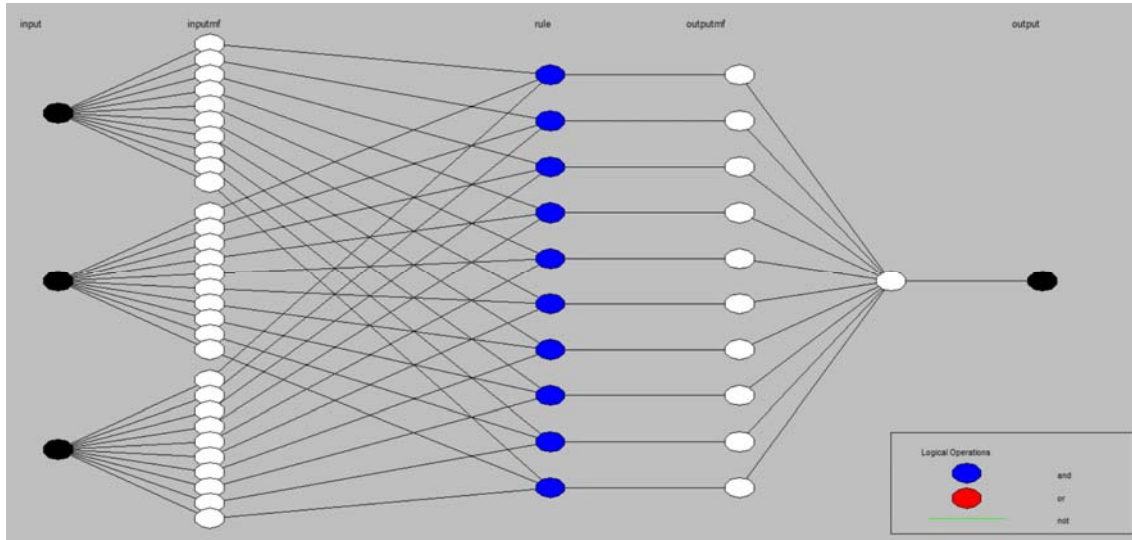
-نرمالسازی وزنها (جمع بندی)

-ایجاد خروجی‌های وزندار

-جمع

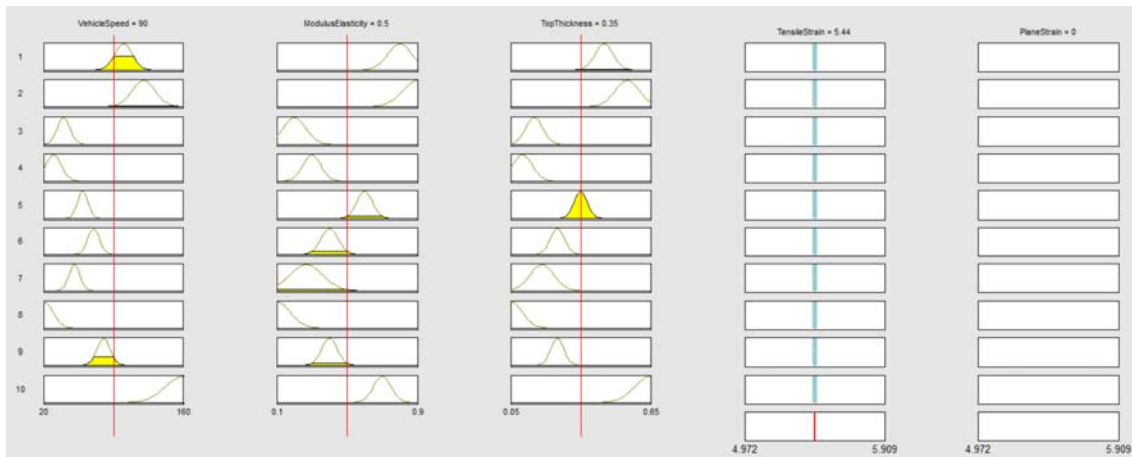
-خروجی

در این تحقیق از سیستم استنتاج فازی-عصبی سوگنو استفاده شده است. به ازاء هر ورودی ۱۰ تابع عضویت گوسی تعریف شده که در نهایت منجر به ایجاد ۱۰ قاعده شد. برای ایجاد سیستم استنتاج فازی از تابع 3genfis استفاده شد. ساختار سیستم استنتاج فازی-عصبی به کار گرفته شده در این تحقیق در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. مدل‌سازی به وسیله این روش در نرم‌افزار متلب انجام شده است. مدل انفیس نهایی پژوهش حاضر که در آن ابتدا متغیرهای ورودی



شکل ۱۴. ساختار مدل انفیس پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه بر اساس سه پارامتر ورودی

در شکل‌های بعدی نوع و چگونگی تأثیرگذاری پارامترهای ورودی بر پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه نشان داده شده است.



شکل ۱۵. مدل نهایی پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه با روش ANFIS

مورد بررسی به عنوان ارزیابی دقت الگوریتم مورد تحلیل قرار گرفت. در نهایت ساختار مدل پیش‌بینی خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مبتنی بر سرعت وسیله نقلیه بر اساس سه پارامتر ورودی ساخته می‌گردد. عملکرد روش انفیس در مقایسه با روش شبکه عصبی برای تشخیص خرابی بحرانی

در فرآیند آموزش الگوریتم، ۷۰٪ داده‌های مورد بررسی به عنوان مجموعه داده‌های آموزش در نظر گرفته شد. سپس داده‌های تست که در فرآیند آموزش مدل استفاده نگردیده بود، به منظور تست مدل پیشنهادی به مدل داده شد. اختلاف مقدار واقعی با مقدار پیش‌بینی شده با تعیین مقدار RMSE در بازه

روسازی انعطاف‌پذیر در جدول (۲) خلاصه شده است. ترکیبی عصبی-فازی (انفیس) نسبت به شبکه عصبی عملکرد در بررسی عملکرد دو الگوریتم و با توجه به نتایج، روش بهتری داشته است.

جدول ۲. خلاصه عملکرد روش‌های مختلف پیاده‌سازی

داده‌های اعتبارسنجی		داده‌های تست		داده‌های آموزش		روش
درصد خطا	RMSE	درصد خطا	RMSE	درصد خطا	RMSE	
۱۵/۱۵ %	۰/۰۰۲۹۶	۱۶/۴۲ %	۰/۰۰۲۵۹	۱۵/۲۵ %	۰/۰۰۲۸۴	شبکه عصبی
۱۴/۶۲ %	۰/۰۰۲۴۷	۱۵/۸۷ %	۰/۰۰۱۹۸	۱۵/۱۴ %	۰/۰۰۲۴۵	شبکه عصبی-فازی

## ۵- نتیجه گیری

خیزروسازی بیشتر می‌شود و هرچه سرعت وسیله نقلیه کمتر شود، تعداد تکرار بار منجر به خرابی نیز کاهش می‌یابد و افزایش سرعت باعث می‌شود که خرابی در روسازی کمتر شود. با افزایش سرعت، کاهش زمان بارگذاری مقدار ترک‌های خستگی و شیار شدگی کاهش پیدا می‌کند و هرچه قدر سرعت پایین‌تر باشد، خرابی‌های ذکر شده زودتر رخ می‌دهد. همچنین می‌توان گفت که با کاهش سرعت وسیله نقلیه (افزایش زمان بارگذاری) و ثابت نگه‌داشتن کلیه عوامل تأثیرگذار، تعداد تکرار منجر به خرابی خستگی و شیارشدگی بستر کاهش پیدا می‌کند.

از جمله خرابی‌هایی که در روسازی‌های انعطاف‌پذیر بسیار رایج است و در این مقاله به بررسی آن‌ها پرداخته شد. شیارشدگی، ترک‌های خستگی و خرابی‌هایی که بر پایه افت و خیز روسازی است که در این مطالعه سعی شده تأثیر سرعت بارگذاری وسایل نقلیه بر روی این خرابی‌ها بررسی شده و اثر آن بر تک تک این خرابی‌ها بیان شد. با توجه به نتایج با افزایش سرعت وسیله نقلیه (کاهش مدت زمان بارگذاری) تعداد تکرار منجر به خرابی خستگی، شیارشدگی بستر افزایش پیدا می‌کند. از این رو در سرعت‌های پایین وسایل نقلیه، احتمال وجود خرابی‌های خستگی، شیارشدگی و افت و

## ۶- مراجع

Controlled Low-strength Material Base Supporting a High-volume Asphalt Pavement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(6), 2055-2063.

-Georgouli, K., Plati, C., & Loizos, A. (2021). Autonomous vehicles wheel wander: Structural impact on flexible pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 388-398. doi.org/10.1016/j.jtte.2021.04.002

-Hafez, M., Mousa, R., Awed, A., & El-Badawy, S. (2018). Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology, Cham.

-Hanandeh, S. (2022). Introducing mathematical modeling to estimate pavement quality index of flexible pavements based on genetic algorithm and artificial neural networks. *Case Studies in*

-منهاج، م. ب. (۱۳۹۳). مبانی شبکه‌های عصبی: هوش محاسباتی. دانشگاه امیرکبیر.

-Al-Qadi, L., Osman Erman, G., Jaime, A., Hernandez, A., & Gamez, I. (2016). Quantitative Assessment of the Effect of Wide-Base Tires on Pavement Response by Finite Element Analysis. *Journal of the Transportation Research Board*, 2590.

-Bhandari, S., Xiaohua, L., & Feng, W. (2022). Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance. *International Journal of Transportation Science and Technology*. doi.org/10.1016/j.ijst.2022.02.004

-Chompoorat, T., Likitlarsuang, S., & Jongvivatsakul, P. (2018). The Performance of

- Khabiri, M. M. (2010). The effect of stabilized subbase containing waste construction materials on reduction of pavement rutting depth. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1211-1219.
- Kim, J., Sholar, G. A., & Kim, S. (2008). Determination of accurate creep compliance and relaxation modulus at a single temperature for viscoelastic solids. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2), 147-156.
- Pauli, K., Antti, K., & Ville, H. (2015). Effect of Tire Configuration on the Performance of a Low-Volume Road Exposed to Heavy Axle Loads. *Journal of the Transportation Research Board*, 2474.
- Rith, M., Kim, Y. K., & Lee, S. W. (2018). Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area. *Construction and Building Materials*, 175, 144-151.
- Subhy, A. (2017). Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterizations of modified bitumen: literature review. *Construction and Building Materials*, 156, 28-45.
- Construction Materials*, 16, e00991.  
**doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00991**
- Hernandez, J., Gamez, A., Al-Qadi, I., & De Beer, M. (2014). Analytical Approach for Predicting Three-Dimensional Tire-Pavement Contact Load. *Journal of the Transportation Research Board*, 2456.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Prentice-Hall Inc.
- Issa, A., Haya, S., & Mohammad, G. (2022). Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach. *Ain Shams Engineering Journal*, 1(13), 101490.  
**doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.033**
- Javidi, M. M., & Roshan, E. F. (2013). Speech emotion recognition by using combination of C5.0, neural network and support vector machine classification methods. *Journal of mathematics and Computer Science*, 6, 191 - 200.
- Keymanesh, M. R., Pirhadi, A., Mirshekarian, B., & Jafarian, Y. A. (2016). Sensitive Analysis of the speed of vehicle on the bottom stress of flexible pavement using finite element software. *Civil Engineering Journal*, 115, 62-74.

# Designing a Vehicle Speed Model on Critical Failure of Flexible Pavement

*Morteza Oveysifar, M.Sc., Student, Faculty of Engineering and Technology,  
Islamic Azad University of Birjand, Birjand, Iran.*

*Mohammad Abedini, Assistant Professor, Faculty of Engineering and Technology,  
Islamic Azad University of Birjand, Birjand, Iran.*

*E-mail: M.abedini@iaubir.ac.ir*

Received: June 2023- Accepted: November 2023

## ABSTRACT

The speed of vehicles can affect the performance and damage of the pavement, The two major failures in flexible pavements are fatigue cracks and rutting. The tensile stress under overlay and the compressive stress on the subgrade depend on various factors such as the speed and amount of passing load and contact surface pressure. In this research, machine learning algorithms have been used to predict the critical failure of flexible pavement based on vehicle speed. In the process of using neural networks, the data of neural networks first selects a series of random values as the primary weights and biases of the network which is one of its deficiencies. Therefore, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to optimize the weight of neural networks. In comparison with optimization algorithms, PSO is simpler for implementation and can rapidly find optimal point. According to the modeling results, at low vehicle speeds, the probability of fatigue failures, rutting, and settling increases, while the lower the speed of the vehicle, the number of repetitions is reduced, and the increase in speed causes that Less damage to the pavement.

**Keywords:** Vehicle Speed, Critical Failure, Flexible Pavement, Neural-Fuzzy Network, Particle Swarm Optimization Algorithm