

تعیین ضریب بار هم‌ارز مبتنی بر الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

فاضل فصیحی^۱، محمودرضا کی منش^{۲*}، سید علی صحاف^۳ و سهیل قره^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳	یکی از مشکلات اصلی در زمینه روسازی راه‌ها، عدم شناخت دقیق رفتار روسازی تحت بارهای عبوری و در نتیجه عدم امکان تعیین ضریب بار هم‌ارز در تبدیل بارها به بار معادل است. تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده که کامل‌ترین آن‌ها، روش مبتنی بر آزمایشات جامع اشتهو است. ضعف اصلی ضرایب بار هم‌ارز در این روش، محدودیت نتایج به محورهای بررسی شده بوده که باعث عدم امکان تعیین دقیق ضرایب بار هم‌ارز برای تمامی محورهای موجود است. این علت را می‌توان یکی از دلایل بروز خرابی‌های زودرس و صرف هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری راه‌ها دانست. امروزه، با پیشرفت علم نرم‌افزارهای بسیاری در زمینه تحلیل روسازی‌ها ایجاد شد که می‌توان از آن‌ها در تعیین این ضریب استفاده کرد. مشکل اصلی موجود در تمامی آن‌ها، نیاز به داده‌های ورودی متعدد، زمان‌بر بودن فرایند شبیه‌سازی و امکان بررسی تنها یک مقطع در هر زمان می‌باشد. از طرف دیگر شبکه‌های عصبی مصنوعی، به عنوان یکی از شاخه‌های علم هوش مصنوعی دارای مزایای زیادی است که از آن جمله می‌توان محدود کردن تعداد داده‌های ورودی، سرعت بالای فرایند مدل‌سازی، توانایی مدل‌سازی هم‌زمان چندین روسازی با شرایط مختلف را نام برد. لذا در این پژوهش پس از اطمینان از صحت نحوه مدل‌سازی روسازی‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به طرح شبکه عصبی مصنوعی جهت تعیین ضریب بار هم‌ارز پرداخته شده است. در نهایت شبکه بهینه از نوع انتشار برگشتی پیش‌خور با آرایش ۱-۱۳-۷ و تابع انتقال سیگموئید بعنوان شبکه بهینه انتخاب گردیده است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱	
واژگان کلیدی: ضریب بار هم‌ارز، شبکه عصبی مصنوعی، اجزای محدود، آباکوس، روسازی‌های انعطاف‌پذیر.	

۱- مقدمه

پارامترهای کلیدی در تحلیل و طراحی سازه‌های روسازی به شمار می‌آید. به دلیل تنوع بالای بارهای عبوری، در اکثر دستورات عمل‌های طراحی روسازی راه‌ها مانند اشتهو، بارگذاری ترافیک بر اساس تعداد بار عبوری محور منفرد معادل بیان شده که در آن محور چرخ‌های مختلف عبوری به ترافیک استاندارد معادل تبدیل می‌شود. هرگونه نقص اطلاعات و یا فرضیات نادرست ممکن است منجر به خرابی روسازی تحت تأثیر خستگی و یا شیارشدگی شود.

روسازی راه‌ها به طور دائم در معرض انواع مختلفی از تنش‌های ناشی از عواملی مانند بار ترافیکی، تغییرات دما، میزان رطوبت، و تغییر شکل لایه‌های زیرین و بستر قرار دارد. در میان تمام عوامل مذکور، امروزه به دلیل افزایش روزافزون ترافیک و بار محوری خودروها، بارگذاری‌ها تأثیر بیشتری بر افت کیفیت روسازی داشته و باعث کاهش عمر مفید روسازی‌ها می‌گردد. لذا داده‌های ترافیکی یکی از

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

۱. دانش‌پذیر دکترای راه و ترابری، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

۲. استادیار، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد

۴. دانشیار، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

$$G_t = \log \left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right) \quad (4)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x - L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (5)$$

در رابطه فوق W_{t18} : تعداد معادل بار استاندارد ۱۸ کیلوپاوند (۸۰ کیلوپاسکال)، W_{tx} : تعداد عبور محور با وزن x ، L_x : بار محور x (کیلوپاوند)، L_2 : شاخص نوع محور (۱، ۲ و ۳ به ترتیب برای محورهای منفرد، دوگانه و سه‌گانه)، p_t : نشانه خدمت‌دهی نهایی، SN : عدد سازه‌ای روسازی و β_{18} : از رابطه (۵) با فرض L_x و L_2 به ترتیب برابر با ۱۸ و ۱ است. در روش‌های تئوری، مقدار $EALF$ مطابق رابطه (۶) نسبت عمر روسازی برای محور استاندارد به عمر روسازی برای بار واقعی است [۵].

$$EALF = \frac{N_{80}}{N_x} \quad (6)$$

در رابطه فوق N_{80} و N_x : به ترتیب تعداد عبور بار محوری استاندارد و بار محوری واقعی تا زمان وقوع خرابی ناشی از خستگی است. با توجه به اینکه، معیار تعیین ضریب هم‌ارز در رابطه فوق خرابی ناشی از خستگی است، تعداد عبور مجاز را می‌توان طبق رابطه (۷) بیان کرد.

$$N = \alpha \times E^{(-b)} \times \varepsilon^{(-c)} \quad (7)$$

در رابطه فوق، N : تعداد عبور مجاز (تا قبل از وقوع خرابی ناشی از خستگی)، E : مدول اختلاط آسفالت، ε : کرنش کششی زیر لایه آسفالت و a و b و c : مقادیر تجربی است. با جایگزینی رابطه ۷ در رابطه ۶، رابطه ۸ به دست می‌آید.

$$EALF = \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{80}} \right)^c \quad (8)$$

که در آن ε_x : کرنش کششی ناشی از محور واقعی، ε_{80} : کرنش کششی برای محور استاندارد (۸۰ کیلوپاسکال بار محوری یا ۱۸ کیلوپاوند) و c مقدار تجربی است. از رابطه فوق برای محاسبه ضریب بار هم‌ارز در تمام سازه‌های روسازی و انواع محورها و آرایش چرخ‌ها با معیار خرابی ناشی از خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

ایراد اساسی روابط بیان شده نادیده گرفتن بسیاری از پارامترهای تأثیرگذار و محدودیت آن به محورهای بررسی شده در آزمایشات است. اما امروزه با پیشرفت تولید خودرو

در یک نگاه کلی، تحلیل سازه‌ای روسازی شامل سه بخش شناخت خصوصیات مصالح، مدل نظری برای پاسخ سازه روسازی و شرایط محیطی است [۱]. سه فرضیه‌ی رفتاری مصالح که معمولاً برای تحلیل روسازی‌ها مد نظر قرار می‌گیرند، عبارت است از: رابطه‌ی موجود بین تنش و کرنش (خطی یا غیرخطی)، توانایی مصالح برای بازگشت کرنش پس از حذف تنش و وابستگی کرنش به زمان در شرایط بار ثابت. روش‌های مختلفی برای تحلیل سازه‌ای روسازی و محاسبه پاسخ‌های آن در دست است که از میان آن‌ها در این پژوهش از روش اجزای محدود به‌عنوان یک تکنیک محاسباتی برای یافتن حل عددی استفاده شده است [۲]. از مهم‌ترین مزایای این روش زمان و هزینه بسیار پایین آن نسبت به روش‌های آزمایشگاهی و دقت بالا در حل مسائل به خصوص مدل‌های پیچیده نسبت به سایر روش‌های عددی را می‌توان نام برد.

در نهایت، هدف اصلی این پژوهش، دستیابی به یک مدل جامع شبکه عصبی مصنوعی برای محاسبه ضریب بار هم‌ارز بر اساس ۷۵۰ مدل مختلف در نرم‌افزار تحلیلی اجزای محدود آباکوس است.

۲- روش تحقیق

در روش تجربی آشتو، برای محاسبه تعداد بار محور منفرد معادل (ESAL)^۱، شاخص خدمت‌دهی نهایی، نوع روسازی و عدد سازه روسازی (SN)^۲ مورد استفاده قرار گرفته است. رابطه (۱) تا (۵) نحوه تبدیل بارها به بار معادل را نشان می‌دهد [۳]، [۴].

$$ESAL = \sum_{i=1}^m EALF_i \times n_i \quad (1)$$

در رابطه فوق i : تعداد انواع مختلف محورها (۱ تا m)، $EALF_i$: ضریب بار هم‌ارز برای محور نوع i م و n_i : تعداد محور عبوری نوع i است. $EALF$ برای هر محور در روسازی‌های انعطاف‌پذیر بر مبنای آزمایشات آشتو ۱۹۶۲، مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$EALF = \frac{W_{t18}}{W_{tx}} \quad (2)$$

$$\log \left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}} \right) = 4.79 \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (3)$$

³. Equivalent Axle Load Factor

¹. Equivalent Single Axle Load

². Structural Number

و ۳۰ درصد مقادیر بیشتری را برای روسازی نازک تا متوسط به دست آورده و برای روسازی ضخیم تفاوت میان این دو روش قابل صرف نظر کردن است [۸].

ضرایب بار هم‌ارز بر مبنای خرابی خستگی و شیار افتادگی در روسازی آسفالتی و تحت بارگذاری‌های مختلف در محورهای منفرد و دوگانه توسط عبدالمطلب مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان داد در محورهای منفرد و دوگانه برای بارهای به ترتیب تا ۸/۲ و ۱۷/۳۱ تن مقادیر ضرایب بار هم‌ارز بر اساس خرابی خستگی بیشتر از مقادیر به دست آمده بر مبنای خرابی شیارشدگی است. از طرفی ضرایب بار هم‌ارز خستگی به مقدار فشار بار حساس هستند، در حالی که ضرایب بار هم‌ارز بر مبنای معیار شیارشدگی نسبت به فشار بار تقریباً غیرحساس است [۹]. جودیکی، ضرایب بار هم‌ارز محوری برای روسازی انعطاف‌پذیر و نیمه‌صلب را بر مبنای معیار خستگی تعیین کرد. در این مطالعه مشخص شد ضرایب بار هم‌ارز حاصل شده از معیار خستگی برای روسازی‌های انعطاف‌پذیر مطابقت خوبی با معادله توان چهارم داشته؛ درحالی‌که در روسازی نیمه‌صلب، مقادیر فرمول پیچیدگی بیشتری دارد [۴].

تأثیر تغییرات فصل‌ها در ضرایب بار هم‌ارز در محورهای سنگین (کامیون) در راه‌های پاکستان توسط چانودری و ممون مورد مطالعه قرار گرفته، سپس نتایج مطالعه را با مقادیر واقعی مقایسه کردند. در نهایت مشخص شد که کامیون سه‌محور با محورهای منفرد (۲۹/۵ تن) و محورهای دوگانه (۲۷/۵ تن)، مخرب‌ترین نوع کامیون است و ضریب واقعی ۶/۴ برابر بیشتر از ضریب طرح است [۱۰].

در سال ۲۰۱۴، آموریم و همکاران برای محاسبه ضریب بار هم‌ارز؛ یک شبکه عصبی مصنوعی را مدل کرده و تأثیر نوع چرخ را بر آن بررسی کردند. نتایج این مطالعات نشان داد که چرخ تک حدوداً ۱۰ برابر بزرگتر از چرخ زوج در شرایط یکسان است [۳].

ماکیا و همکاران مطالعه‌ای مقایسه‌ای بر نتایج ضریب بار هم‌ارز به روش اشتو و مکانیستیک در ترافیک عبوری از جاده‌های کشور کلمبیا انجام دادند و در نهایت برای تعیین ضرایب هم‌ارز در مسیرهای با حجم تردد متوسط و زیاد یک رابطه لگاریتمی پیشنهاد دادند [۱۱].

تأثیر بار محورهای چندگانه تحت عبور کامیون‌های سنگین بر خستگی روسازی‌های آسفالتی توسط هومسی و همکاران بررسی شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد، عمر خستگی در

و تنوع بالا در وزن و ابعاد آن‌ها، محورهای متنوعی ساخته شده‌اند و ممکن است فشارهای متفاوتی را به سازه روسازی وارد کنند که در هیچ مدل تحلیلی برای محاسبه ضریب بار هم‌ارز در نظر گرفته نشده است. لذا عدم در نظرگیری این محورها باعث ایجاد خطا در تحلیل و طراحی روسازی‌ها شده و خود عامل اضمحلال زودرس روسازی‌ها و صرف هزینه‌های بالای نگهداری می‌گردد. لذا در این پژوهش با هدف دستیابی به مقادیر ضریب بار هم‌ارز در روسازی‌های انعطاف‌پذیر به روش اجزای محدود، مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس بصورت سه بعدی و بر مبنای معیار خستگی انجام شده است. متغیرهای مدل جهت طرح یک شبکه عصبی مشخصات مصالح همچون ضخامت لایه‌ها و مشخصات مقاومتی هر لایه، آرایش مختلف محورها با انواع چرخ‌ها (اعم از چرخ تک و زوج)، سطح تماس، فشار چرخ‌ها و سختی روسازی بارهای مختلف می‌باشد.

۳- مروری بر مطالعات پیشین

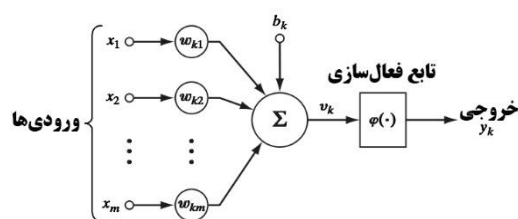
همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، مهم‌ترین ضعف روابط تعیین ضریب بار هم‌ارز، محدودیت آن به محورهای آزمایش شده و عدم در نظر گرفتن انواع مختلف محورهای جدید است. همین امر سبب شد تا مطالعاتی در زمینه پارامترهای مؤثر بر ضریب بار هم‌ارز انجام شود. زاقول و وایت میزان تأثیر بارهای سنگین بر ضریب بار هم‌ارز بر مبنای تغییر شکل دائمی روسازی‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی المان محدود با تحلیل استاتیکی و دینامیکی را در بزرگراه‌های هند مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که ضریب بار هم‌ارز در پژوهش انجام شده مطابق با مقادیر آشتو است [۷].

چتی و همکاران، تعدادی مقطع روسازی نازک، متوسط و ضخیم را برای سه نوع محور منفرد، دوگانه و سه‌گانه مورد مطالعه قرار داده و سپس با استفاده از فرمول تجربی ارائه شده در مطالعه SHRP8 عمر خستگی را محاسبه و ضریب بار هم‌ارز را از روش‌های کرنش و انرژی تلف شده به دست آوردند. در نهایت نتایج مطالعات را با مقادیر حاصل از روش اشتو مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که برای محور منفرد با چرخ زوج، کرنش حداکثر در جهت طولی بیشتر از جهت عرضی بوده؛ درحالی‌که در مورد محورهای دوگانه و سه‌گانه با چرخ تک، کرنش حداکثر عرضی بیشتر از طولی است. همچنین نتیجه گرفتند که در روش انرژی تلف شده، ضریب بار هم‌ارز در محور دوگانه و سه‌گانه به ترتیب در حدود ۲۰

خروجی را با استفاده از اتصال نورون‌های هر گروه به لایه‌های قبلی و بعدی محاسبه می‌کند [۱۸]. این شبکه‌ها با استفاده از ابزارهای تطابقی خود، الگوی بین داده‌های ورودی و خروجی را یافته و آموزش می‌بینند [۱۹].

شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای کاربردهای متنوعی هستند که رایج‌ترین آنان را می‌توان در پنج دسته پیش‌بینی، دسته‌بندی، ارتباط‌دهی داده‌ها، مفهوم‌سازی داده‌ها، اصلاح داده‌ها بیان کرد [۲۰].

در حالت کلی، شبکه‌های عصبی از سه لایه کلی ورودی، لایه (یا لایه‌های) پنهان و خروجی تشکیل شده است (شکل ۱). در لایه ورودی، پارامترهای وابسته جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی استفاده می‌شود، لایه (یا لایه‌های) پنهان رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی در مرحله آموزش را تعیین کرده و در نهایت لایه خروجی، مقادیر خروجی‌های موردنظر را بر مبنای لایه‌های پیشین خود و ضرایب وزنی به دست آمده از فرایند آموزش محاسبه می‌کند [۲۱]. تعداد نورون‌ها در لایه ورودی و خروجی به ترتیب بر اساس تعداد پارامترهای موثر بر مقدار خروجی و متغیر (یا متغیرهای) موردنظر تعیین می‌شود.



شکل ۱- یک نمونه شبکه عصبی

رابطه کلی شبکه‌های عصبی مصنوعی که بوسیله مکتوب و پیت به دست آمده به شرح زیر است [۲۲]:

$$u = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i - \theta \quad (9)$$

$$y = g(u) \quad (10)$$

در رابطه فوق x_i : پارامترهای ورودی، w_i : وزن پارامتر ورودی u ، θ : بیشینه فعال‌سازی، u : آستانه فعال‌سازی (اگر این مقدار مثبت باشد بعنوان مثال $u \geq \theta$)، یک مقدار تولید می‌کند؛ در غیراین صورت غیرفعال خواهد بود، g : تابع انتقال و y : مقدار خروجی خواهد بود.

میان پارامترهای بررسی شده (آرایش، شدت و سرعت بارگذاری) بیشترین وابستگی را به آرایش و شکل بارگذاری دارد [۱۲].

رایس و همکاران نیز تحقیقاتی بر روی چهار روش تعیین ضرایب هم‌ارز بار با استفاده از نتایج میدانی و داده‌های آزمایش اشتهو انجام دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که معادله توان چهارم اشتهو ۱۹۹۳ و LCPC مقادیر مشابهی را به دست می‌آورد که از مقادیر به دست آمده از روش مکانیستیک - تجربی کمتر است. در نهایت نتیجه گرفتند ضریب دینامیک بار، وزن در حال حرکت محور و ضربه ناشی از عبور محورهای با وزن بیش از حد بیشترین تأثیر را در تعیین مقدار ضریب هم‌ارز دارد [۱۳].

تأثیرات فصلی بر ضریب بار هم‌ارز در چین نیز توسط ژانگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها روسازی را در سه فصل شبیه‌سازی کرده و در نهایت برای پیش‌بینی ضریب بار هم‌ارز بر اساس تغییرات فصلی، یک شبکه عصبی مصنوعی مدل کردند [۱۴].

در سال ۲۰۲۰ مدل‌سازی سه بعدی در نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل روسازی‌های آسفالتی دولایه توسط سینق و ساهو انجام شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که پاسخ روسازی وابستگی کمی به ضریب پواسن داشته و بیشتر تحت تأثیر نسبت‌های مدول دو لایه و ضخامت روسازی به عرض چرخ است [۱۵].

در مطالعه دیگری توسط دنگ و همکاران، خرابی روسازی تحت بارهای عبوری در حالت سه بعدی و دو بعدی متقارن محوری با در نظرگیری شروع مرحله ترک مدل‌سازی شد. در این مطالعه فاصله زمانی بین بارگذاری و شروع ترک‌ها با عنوان "زاویه تأخیر" معرفی شد. مطالعات آن‌ها نشان داد زاویه تأخیر به شدت خرابی، سرعت عبور بار، خصوصیات مصالح روسازی بستگی دارد [۱۶].

۴- الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی

روش‌های جدیدتر مدل‌سازی همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی بر مبنای پردازش اطلاعات و ساختار محاسباتی موازی بنا نهاده شده است. شبکه‌های عصبی که مبتنی بر الگو برداشتن از مغز انسان به وجود آمده است، همانند بدن انسان از سلول‌هایی که به یکدیگر پیوند خورده‌اند، تشکیل شده [۱۷] و ارتباط غیرخطی میان داده‌های ورودی و

¹ Lag angle

$$F^{L+L}(n(k)) = [f^{L+L}(n_L(k) \dots f^{L+L}(n_{L+1}(k)))]^T \quad (14)$$

در نهایت ماتریس‌های وزن و بردارهای بایاس شبکه چند لایه با روابط زیر تنظیم می‌گردد:

$$W^L(k+1) = W^L(k) - a\delta^L(k)(a^{L-1}(k))^T \quad (15)$$

$$b^L(k+1) = b^L(k) - a\delta^L(k) \quad (16)$$

که در آن $L=1,2,\dots,L$ است.

در نهایت، در فرایند آموزش شبکه هنگامی که تغییرات دو شاخص میانگین مربعات خطا در هر سیکل (رابطه ۱۷) از مقدار تعیین شده کمتر باشد، شبکه آموزش را متوقف می‌کند.

$$MSE = \frac{1}{mN} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^m (y_j^k - t_j^k)^2 \quad (17)$$

در رابطه فوق m : تعداد نورون‌های خروجی و: n تعداد نمونه‌های آموزش است.

۴-۱- شبیه‌سازی روسازی

همان‌طور که اشاره شد، هدف اصلی پژوهش بهبود فرایند تعیین ضریب بار هم‌ارز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای هر نوع محور است. برای رسیدن به این هدف از یک شبیه‌سازی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مبتنی بر روش اجزای محدود با بارگذاری دینامیکی بر مبنای معیار خستگی برای محورهای مختلف منفرد، دوگانه و سه‌گانه انجام شده است. در شبیه‌سازی اجزای محدود، پارامترهای مهمی همچون نوع المان، ابعاد، مش‌بندی، شرایط مرزی بر میزان نتایج تأثیر دارد. شرایط مرزی در یک مدل هندسی مناسب نباید بر تحلیل دینامیکی و پاسخ‌های حاصل از آن تأثیر داشته باشد و باید بتواند انعکاس موج بار و انرژی امواج برشی را به حداقل برساند [۲۵]. به همین دلیل، در مدل‌سازی در اطراف مدل از المان‌های نامحدود خطی با ۸ گره (CIN3D8) و در سایر بخش‌ها از المان‌های ۸ گره‌ای مکعبی با فرمول‌بندی کاهش یافته و دارای سه درجه آزادی انتقالی (C3D8R) استفاده شده است [۲۶]–[۲۸].

در بیشتر مطالعات پیشین بارگذاری خودروها به صورت استاتیک در نظر گرفته شده است، اما عملکرد روسازی به شدت تحت تأثیر بارهای دینامیکی است [۲۹]، [۳۰].

از میان انواع رایج شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه‌های انتشار برگشتی^۱ یکی از معروف‌ترین و آسان‌ترین مدل‌ها در میان شبکه‌های پیچیده و چند لایه بوده که جهت خواندن متن، پیش‌بینی و پیش‌گویی و ردیابی چندین هدف در اوایل دهه ۱۹۷۰ منتشر گردید [۲۳]. لذا در این پژوهش که هدف پیش‌بینی و تعیین ضرایب هم‌ارز محورها است، از این شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است.

در شبیه‌سازی این نوع شبکه، پیش از شروع کار، باید داده‌های ورودی را به دو گروه آموزش و آزمایش تقسیم کرد. عمدتاً از میان کل داده‌ها ۶۰ تا ۷۰٪ آن‌ها را به عنوان داده‌های آموزش انتخاب می‌کنند. پس از آموزش شبکه توسط داده‌های آموزش تا رسیدن به حداقل خطا، مابقی داده‌ها (۳۰ تا ۴۰٪ باقی‌مانده) که در آموزش نقشی نداشته‌اند، به عنوان ورودی به شبکه داده شده و پاسخ شبکه با پاسخ صحیح مقایسه می‌گردد تا بدین ترتیب راندمان شبکه آموزش دیده بررسی شود [۱۹]–[۲۳]. نحوه آموزش شبکه بر مبنای داده‌ها نیز به پنج روش اصلاح خطاها، بولتزمن^۲، هب^۳، رقابتی و پرسپترون^۴ امکان‌پذیر است [۲۴].

گام بعدی در شبیه‌سازی، انتخاب نوع تابع خروجی نورون است که در شبکه‌های انتشار برگشتی، عموماً تابع سیگموئید استفاده می‌شود. دلیل این امر هم مشتق‌گیری ساده و ارتباط مستقیم مشتق تابع با خود تابع است. در الگوریتم شبکه‌های انتشار برگشتی دو روش محاسباتی موجود است. روش اول، پیشخور یا رفت و روش دوم، پسخور یا برگشت نامیده می‌شود که به دلیل استفاده از روش رفت یا پیشخور در این پژوهش، در ادامه تنها به بیان معادلات آن پرداخته شده است [۲۳].

$$a = p(k) \quad (11)$$

$$a^{L+1} = F^{L+1}(W^{L+1}(k)a^L + b^{L+1}(k)) \quad (12)$$

که در آن $L=0,1,\dots,L-1$ و

$$a(k) = a^L(k) \quad (13)$$

در این مسیر همان‌گونه که روابط نشان می‌دهد، پارامترهای شبکه در خلال اجرای محاسبات رفت تغییر نمی‌کنند و توابع متحرک، روی تک تک نورون‌ها عمل می‌کند، یعنی:

³ Hebb learning

⁴ Perceptron learning

¹ Back Propagation Networks (BP)

² Boltzmann learning

از این‌رو در این پژوهش، شبیه‌سازی بار به صورت دینامیکی و در بازه سرعت ۳۰ تا ۹۰ کیلومتر بر ساعت بوده و در محورهای با چرخ‌های زوج فاصله بین مرکز تا مرکز چرخ‌ها سه برابر شعاع بارگذاری در نظر گرفته شده است.

از آنجایی‌که، معیار خرابی در این پژوهش ترک‌های ناشی از خستگی می‌باشد؛ لذا در محورهای منفرد، کرنش کششی زیر لایه آسفالت تحت بار عبوری در نظر گرفته شده است. اما برای محورهای مرکب مطابق با روش پیشنهاد شده هوانگ کرنش کششی از دو قسمت تشکیل شده است که شامل کرنش ناشی از عبور محور دوم و قسمتی از کرنش

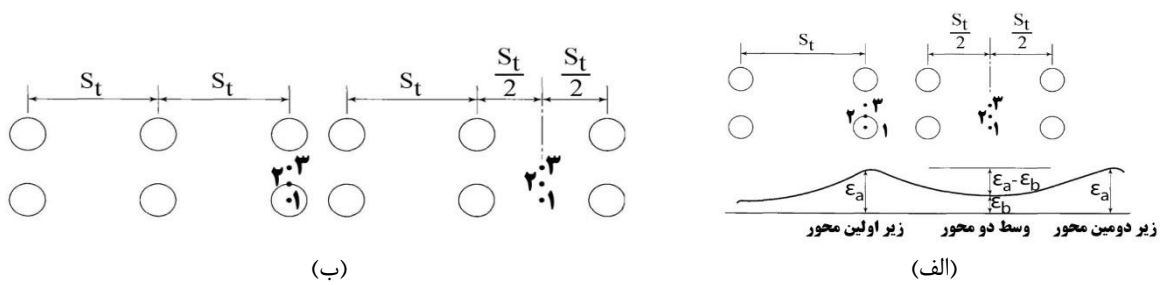
باقی‌مانده از محور اول است [۳۰].

در این روش، محاسبات کرنش بر مبنای نقاط نشان داده شده در شکل (۲) در مرکز چرخ تک، در لبه چرخ تک و در مرکز چرخ زوج است. جهت تعیین مقادیر برای محور اول، کرنش زیر همان محور در نظر گرفته شده (ϵ_a) و برای محور دوم و سوم کرنش حاصل از اختلاف کرنش در محور اول (ϵ_a) و کرنش مرکز حدفاصل دو محور (ϵ_b) و برابر با $\epsilon_a - \epsilon_b$ می‌باشد [۳۰].

جدول ۱ و ۲ و شکل (۳) و (۴) خلاصه‌ای از جزئیات شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد.

جدول ۱- جزئیات شبیه‌سازی المان محدود

شماره مرجع استفاده شده	شرح جزئیات و محدوده مقادیر انتخاب شده	مشخصات		
	ABAQUS (Ver. 6.14)	نرم‌افزار		
[۲۶]-[۲۸]	CIN3D8	اطراف مدل	نوع المان	
	C3D8R	سایر نقاط		
[۳۱]	20R×20R*	مقطع مدل شبیه‌سازی شده		
[۳۱]	140R*	ارتفاع مدل شبیه‌سازی شده		
[۳۲]	تکیه‌گاه غلطکی	اطراف مدل	شرایط مرزی	
	تکیه‌گاه گیردار کامل	زیر مدل		
-	در اطراف بار عبوری ریزتر و با دور شدن از محل بارگذاری درشت‌تر	مش بندی		
[۳۳], [۳۴]	نیم‌سینوسی	بارگذاری		
	۳ تا ۳۰ (تن)			
	۱/۲ - ۱/۵			فاصله بین محورها (متر)
	۰/۱ - ۰/۱۲۵			شعاع سطح تماس بار (متر)
[۳۵]	۶ - ۱۴	فرکانس بارگذاری		
[۳۰]	۰ - ۱۵ (درصد)	نسبت میرایی آسفالت		
به دلیل نیاز به جامعیت داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی این پارامتر در یک محدوده مشخص شده انتخاب شده است.	۲۰ - ۱۲۰	اساس	مدول لایه‌ها (مگا پاسکال)	
	۲۰ - ۱۲۰	زیر اساس		
	۲۰ - ۱۸۰	خاک بستر		
-	۰/۴	اساس	ضریب پواسون	
	۰/۴	زیر اساس		
	۰/۴۵	خاک بستر		
به دلیل نیاز به جامعیت داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی این پارامتر در یک محدوده مشخص شده انتخاب شده است.	۰/۱ - ۰/۳	آسفالت	ضخامت لایه‌ها (متر)	
	۰/۱ - ۰/۵	اساس		
	۰/۱ - ۰/۶	زیر اساس		
[۶]	(۸)	شماره رابطه مورد استفاده		
		*R: شعاع سطح تماس بارگذاری		

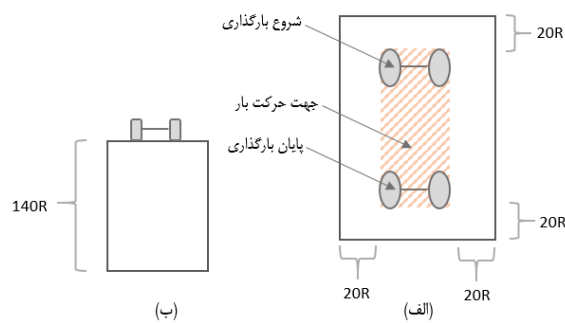


منظور از S_t فاصله بین محورها در حالت محور مرکب است.

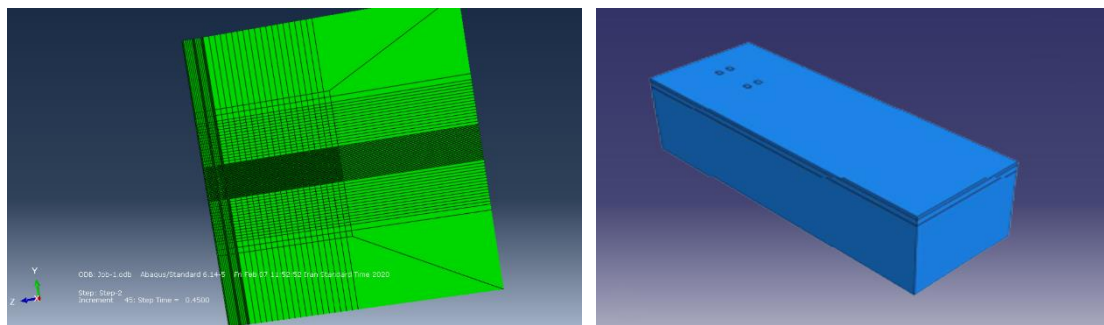
شکل ۲- تحلیل خرابی برای محورهای: الف) دوگانه، ب) سه گانه

جدول ۲- مشخصات لایه آسفالت

مشخصات ویسکو الاستیک آسفالت					مشخصات الاستیک آسفالت		شماره مدل
τ	i (s)	K_i	G_i	n			
۰/۰۲۰۶	۰/۰۷۸	۰/۶۳۱	۰/۶۳۱	۱	۹۸۴۰	مدول الاستیک (مگاپاسکال)	۱
۰/۱۷۳	۰/۸۱۶	۰/۲۵۱	۰/۲۵۱	۲			
۱/۲۹	۵/۶۸	۰/۰۸۴۷	۰/۰۸۴۷	۳			
۵/۳۵	۱۳۹	۰/۰۲۶۶	۰/۰۲۶۶	۴			
۰/۰۱۰۶	۳۴۴	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۶۶۶	۵			
۰/۰۰۰۱۱۳	۰/۰۰۳	۰/۶۳۱	۰/۴۵۲	۱	۱۸۷۹۰	مدول الاستیک (مگاپاسکال)	۲
۰/۰۰۳۱۴	۰/۳	۰/۲۵۱	۰/۲۷۸	۲			
۰/۰۱۳	۳	۰/۰۸۴۷	۰/۱۴۸	۳			
۰/۱۸۴	۱۰	۰/۰۲۶۶	۰/۱۰۸	۴			
۲/۲۹	۱۰۰	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۷۴۶	۵			
					۰/۳۵	ضریب پواسن	



شکل ۳- نمای دو بعدی هندسه روسازی مدل شده در نرم افزار: الف) حالت تک محور در صفحه X و Y، ب) حالت صفحه Z

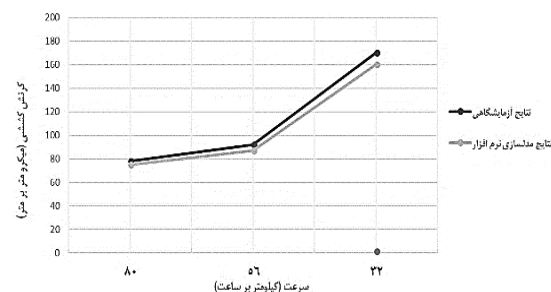


شکل ۴- نمای سه بعدی روسازی مدل شده در نرم افزار

۲-۴- اعتبارسنجی نتایج

هر پژوهش عددی به ویژه روش‌های غیردقیق باید با کمک نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شود. علاوه بر آن، به دلیل اینکه نرم‌افزار آباکوس مبتنی بر روش اجزای محدود، تنها جهت تحلیل روسازی‌ها ایجاد نشده و دارای کاربرد عمومی است و انتخاب نوع المان و خصوصیات مدل همواره تأثیر زیادی در میزان خروجی و دقت نتایج مدل‌سازی دارد. لذا قبل از استفاده از نتایج مدل‌سازی‌ها، باید از صحت مدل‌سازی و دقت آن‌ها در مقایسه با نتایج واقعی اطمینان حاصل کرد که برای اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی از نتایج آزمایش‌های میدانی انجام شده در دانشگاه پنسیلوانیا استفاده شده است [۳۶]. در پژوهش مذکور، سیبالی و همکاران آزمایش‌های میدانی جامعی را جهت بررسی میزان تأثیر سرعت و مقدار بار بر میزان کرنش‌ها در زیر لایه آسفالتی بر روسازی‌های انعطاف‌پذیر انجام دادند، که در آن بار چرخ با سرعت‌های ۳۲، ۵۶ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت از مسیر عبور داده شده و ابزارهای دقیق نصب شده در زیر لایه آسفالت و مسیر عبور چرخ‌ها، مقادیر کرنش را ثبت می‌کردند.

در این پژوهش در راستای اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی پیش از انجام مطالعات تحلیلی، آزمایش‌های انجام شده توسط سیبالی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی عددی سه‌بعدی گردید، که از مقایسه نتایج آزمایش‌های میدانی و مدل‌سازی‌های عددی سه‌بعدی، تطابق و دقت مناسبی مشاهده می‌شود. شکل (۵) مقایسه نتایج مطالعات میدانی سیبالی و همکاران با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی سه‌بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های عددی سه‌بعدی با نتایج مطالعات میدانی سیبالی و همکاران

۳-۴- فرایند آموزش شبکه عصبی

به منظور شبیه‌سازی یک مسأله با استفاده از شبکه‌های

عصبی، پس از دسته‌بندی داده‌ها، اولین کار انتخاب ابعاد شبکه است.

جهت بیان ابعاد شبکه چند لایه، از نمایش عبارتی (R-S-S-S-M) استفاده می‌شود که در آن R تعداد ورودی‌ها و S تعداد نورون‌ها در لایه نام و M تعداد خروجی‌های مورد نظر می‌باشد. در گام اول، انتخاب تعداد لایه‌ها محدود به سه لایه شامل لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی بوده که در صورت عدم دستیابی به دقت قابل قبول، در گام بعدی مدل‌سازی با چهار لایه (شامل دو لایه پنهان) تکرار می‌شود.

در لایه ورودی باید به تعداد ابعاد هر الگوی ورودی، نورون قرار داده شود. بنابراین اندازه لایه ورودی را بعد داده‌های ورودی تعیین می‌کند. در این پژوهش، ورودی‌های در نظر گرفته شده برای شبکه عبارتند از: عدد سازه‌ای (SN)، سرعت، فشار چرخ، سطح تماس، نوع محور، طول محور و سطح خدمت‌دهی نهایی. لذا تعداد ورودی‌ها ۷ است. در لایه خروجی نیز به وضوح باید به تعداد مجهولات مدل، نورون موجود باشد. در حقیقت تعداد نورون‌های لایه خروجی بیانگر تعداد مجهولاتی است که شبکه بایستی پاسخ قابل قبولی برای آن‌ها ارائه دهد که در این پژوهش ضریب بار هم‌ارز محور است؛ پس خروجی نیز مطابق با عدد ۱ است.

در مورد تعداد لایه یا لایه‌های مخفی و تعداد نورون‌ها (در لایه میانی) مبنای خاصی وجود ندارد، ولی فرایند بسیار مهمی بوده و معمولاً با سعی و خطا به صورتی انتخاب می‌شود تا تعداد آن برای حل مسائل با کمبود منابع مواجه نشده و علاوه بر بهینه شدن زمان حل جواب معقولی در اختیار بگذارد. در نهایت، شبکه عصبی انتخاب شده دارای آرایش اولیه ۷-۱۱-۱ بوده، بدین معنی که این شبکه دارای ۷ ورودی، ۱۱ نورون در لایه پنهان و ۱ خروجی می‌باشد.

با مشخص شدن تعداد لایه‌های پنهان، باید نوع توابع انتقال به کار رفته در هر لایه تعیین شود. برای انجام یک تقریب تابع مناسب (رگرسیون غیرخطی) برای تخمین و پیش‌بینی می‌توان از شبکه انتشار برگشتی که تابع انتقال آن در لایه خروجی از نوع خطی ساده و در لایه‌های پنهان از نوع تانژانت سیگموئید می‌باشد، استفاده کرد.

پس از انتخاب معماری شبکه، اولین گام در آموزش شبکه عصبی ارائه الگوهایی است که شبکه بتواند با استفاده از آن‌ها آموزش داده شود. به همین منظور ۷۵۰ تحلیل مختلف

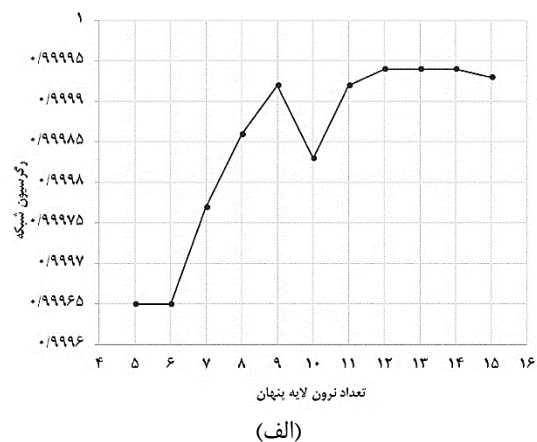
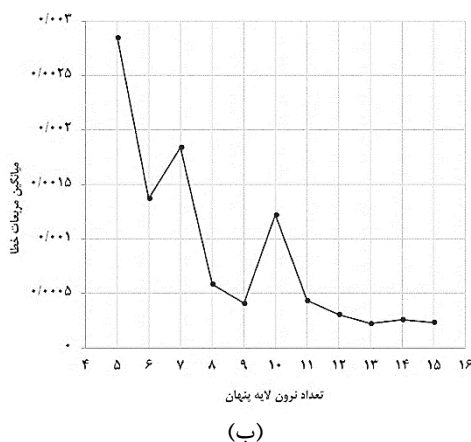
بوده که به ازای آن، میزان تابع عملکرد کمتر از بقیه باشد. در این صورت شبکه به وضعیت پایداری رسیده و به اصطلاح آموزش دیده است.

نرم افزارهای متعددی همچون MATLAB، Neural Solution، Nnet Sheet و ... جهت مدل سازی شبکه های عصبی مصنوعی موجود بوده که در این پژوهش به دلیل محیط کاربری آسان، قدرت بالا و در دسترس بودن آن، از جعبه ابزار Standard NN در نرم افزار MATLAB جهت مدل سازی و یافتن شبکه بهینه استفاده گردید. جهت انتخاب شبکه بهینه، مدل سازی با آرایش های مختلف انجام و میزان خطای تابع عملکرد نیز ثبت گردیده است که نتایج این مدل سازی در جدول ۳ و شکل (۶) آورده شده است.

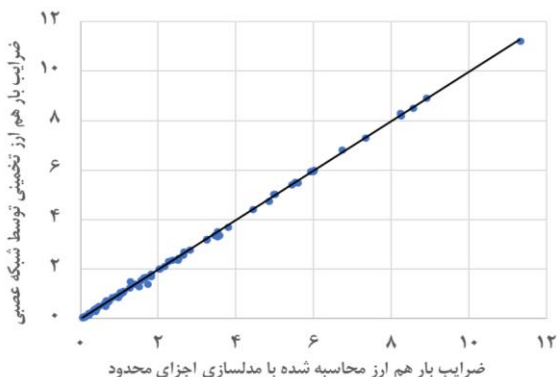
که توسط نرم افزار آباکوس انجام و در بخش قبلی به تشریح آن پرداخته شده است، جهت مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی بکار گرفته شد. در فرایند آموزش شبکه عصبی، اطلاعات آموزشی شامل ورودی ها و خروجی های متناظر با آن ها به شبکه داده شده و شبکه با یک ساختار مشخص طوری عمل می کند که اندازه تابع عملکرد خطا در آن کمینه شود. سپس وزن های شبکه به گونه ای تنظیم می شوند که خطای بین خروجی فعلی و هدف حداقل گردند و یا این که تعداد دفعات آموزش به مقداری که از پیش تعیین شده است، برسد. تابع عملکرد در شبکه های انتشار برگشتی معمولاً تابع میانگین مربعات خطا و یا تابع مجذور مربعات خطا می باشد. در نهایت بهترین شبکه، شبکه های

جدول ۳- تغییرات نورون و انتخاب شبکه بهینه

تعداد نودهای لایه پنهان	رگرسیون				میانگین مربعات خطا
	رگرسیون مرحله آموزش	رگرسیون مرحله اعتبارسنجی	رگرسیون مرحله آزمایش	رگرسیون کل	
۵	۰/۹۹۹۷۲	۰/۹۹۹۳۸	۰/۹۹۹۷۲	۰/۹۹۹۶۵	۰/۰۰۲۸۴۹۲
۶	۰/۹۹۹۷۲	۰/۹۹۹۹۷	۰/۹۹۹۴۲	۰/۹۹۹۶۵	۰/۰۰۱۳۷۱۸
۷	۰/۹۹۹۷۶	۰/۹۹۹۹۶	۰/۹۹۹۶۴	۰/۹۹۹۷۷	۰/۰۰۱۸۴۰۸
۸	۰/۹۹۹۸۶	۰/۹۹۹۸۸	۰/۹۹۹۸۸	۰/۹۹۹۸۶	۰/۰۰۰۵۸۵۴
۹	۰/۹۹۹۹۳	۰/۹۹۹۹۱	۰/۹۹۹۹۱	۰/۹۹۹۹۲	۰/۰۰۰۴۰۹
۱۰	۰/۹۹۹۸۸۳	۰/۹۹۹۹۷	۰/۹۹۹۸۴	۰/۹۹۹۸۳	۰/۰۰۱۲۲۱۲
۱۱	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۹۲	۰/۰۰۰۴۳۵۵
۱۲	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹۳	۰/۹۹۹۹۲	۰/۹۹۹۹۴	۰/۰۰۰۳۰۵۴
۱۳	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۹۸۶	۰/۹۹۹۸۸	۰/۹۹۹۹۴	۰/۰۰۰۲۲۳۵
۱۴	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹۲	۰/۹۹۹۹۴	۰/۰۰۰۲۵۸۴
۱۵	۰/۹۹۹۹۳	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹۳	۰/۹۹۹۹۳	۰/۰۰۰۲۳۴۷



شکل ۶- تغییرات نورون و انتخاب شبکه بهینه براساس: الف - رگرسیون، ب- میانگین مربعات خطاها



شکل ۹- مقایسه نتایج محاسبه شده توسط نرم‌افزار ABAQUS و مقادیر تخمینی توسط شبکه

۵- نتیجه گیری

مهم‌ترین ضعف در خصوص بارهای وارده به سطح روسازی‌ها، عدم وجود رابطه‌ای جامع جهت تبدیل بارهای محوره‌های مختلف عبوری از سطح راه‌ها به بار معادل عبوری است. این مشکل باعث بروز خرابی‌های زودرس یا بروز خستگی و شیارشدگی در سطح به دلیل عدم دقت در تعیین بارگذاری در دوره عمر راه شده و هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری را به وجود می‌آورد.

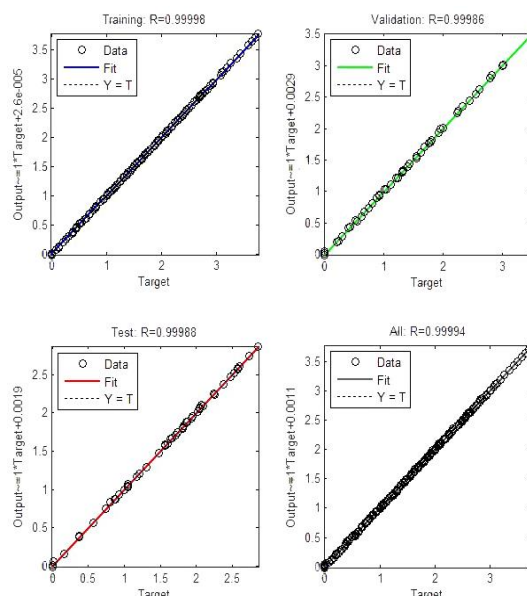
روش‌های مختلفی جهت تحلیل روسازی‌ها و شناخت رفتار آنها جهت وجود دارد که از میان آن‌ها، روش‌های اجزای محدود به دلیل قابلیت مدل‌سازی روسازی‌های دارای هندسه و یا شرایط پیچیده رایج‌تر است. در این پژوهش جهت تعیین ضرایب بار هم‌ارز تحت بارهای متنوع در روسازی‌های مختلف، مدل‌سازی به صورت سه بعدی و در نرم‌افزار اجزای محدودی ABAQUS انجام گرفته است.

از طرف دیگر، با پیشرفت علم در زمینه هوش مصنوعی امکان استفاده از روش‌های نوین مدل‌سازی فراهم شده تا بتوان الگوی رفتار حل مساله را تشخیص داد و به پیش‌بینی رفتار در سایر مدل‌های بررسی نشده پرداخت. یکی از رایج‌ترین شاخه‌های هوش مصنوعی در زمینه پیش‌بینی و تشخیص الگو شبکه‌های عصبی مصنوعی است. از میان انواع شبکه‌های موجود، شبکه انتشار برگشتی دارای دقت بالاتری در پیش‌بینی بوده و با تقریب قابل قبولی نتایج را پیش‌بینی می‌کند.

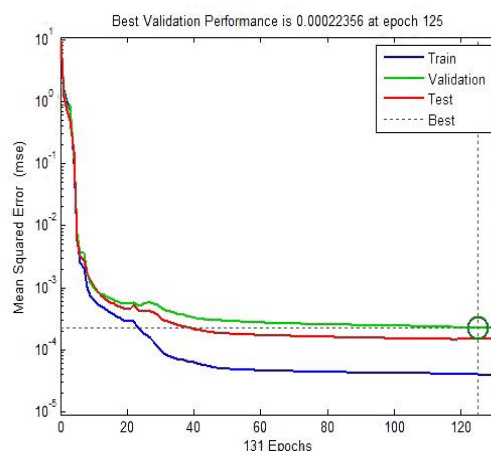
از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش، طرح یک شبکه عصبی جامع جهت پیش‌بینی ضریب بار هم‌ارز است؛ برای مدل‌سازی آن از نتایج حاصل از شبیه‌سازی محوره‌های مختلف بر روسازی‌های متنوع در نرم‌افزار اجزای محدود

۴-۴- انتخاب شبکه عصبی بهینه

در فرایند مدل‌سازی، شبکه بهینه شبکه ایست که علی‌رغم سادگی در آرایش تا حد امکان، دارای تابع تقریب (رگرسیون) بالا و میانگین مربعات خطا پایین باشد [۳۷]. بنابراین مطابق با نتایج نمایش داده شده در جدول ۳ و شکل (۶)، آرایش شبکه بهینه ۱-۱۳-۷ بوده که مقدار رگرسیون کلی ۰/۹۹۹۹۴ نشانگر مطابقت مناسب نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر برآورد شده است. شکل‌های (۷) و (۸)، رگرسیون شبکه و مقادیر خطای مربع به دست آمده از فرایند آموزش را نشان می‌دهد. شکل (۹) نیز میزان دقت شبکه را در تخمین بار هم‌ارز توسط شبکه با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی اجزای محدودی نشان می‌دهد.



شکل ۷- رگرسیون شبکه انتخابی در فرایند آموزش



شکل ۸- میزان تغییرات مجذور مربعات خطا در حین آموزش شبکه

برای پیش‌بینی ضریب بار هم‌ارز محورها بوده و با داده‌های ورودی کمتر، امکان محاسبه و پیش‌بینی خروجی را با سرعت و دقت مناسبی نسبت به نرم‌افزار آباکوس فراهم می‌سازد. علاوه بر آن قابلیت حل چندین مساله به صورت ماتریسی و موازی و ارائه پاسخ آنان به صورت هم‌زمان از مزایای شبکه بوده که از این مزیت می‌توان در راستای یافتن بهینه‌ترین پاسخ با ایجاد تغییرات در مشخصات مساله بهره برد.

آباکوس استفاده شده است. در نهایت با استفاده از ۷۵۰ مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس، از میان شبکه‌های مدل شده، شبکه با آرایش ۱-۱۳-۷ با رگرسیون کلی ۰/۹۹۹۹۴ به عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید. شبکه مدل‌سازی شده دارای یک لایه پنهان بوده که توابع انتقال در لایه پنهان از نوع تانژانت سیگموید و در لایه خروجی از نوع خطی ساده می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی روش مناسبی

مراجع

- [1] Y. R. Kim, "Modeling of asphalt concrete", ASCE Press, 2008.
- [2] R. D. Cook, "Concepts and applications of finite element analysis", John Wiley & Sons, 2007.
- [3] S. I. R. Amorim et, J. C. Pais, A. C. Vale, and M. J. C. Minhoto, "A model for equivalent axle load factors", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, No. 10, 2015, pp. 881-893.
- [4] J. Judycki, "Determination of Equivalent Axle Load Factors on the Basis of Fatigue Criteria for Flexible and Semi-Rigid Pavements", Road Materials and Pavement Design, Vol. 11, No. 1, 2010, pp. 187-202.
- [5] J. N. Boone, "Comparison of Ontario Pavement Designs Using the AASHTO 1993 Empirical Method and the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Method", Waterloo, 2013.
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide A Manual of Practice", AASHTO, 2008.
- [7] S. Zaghoul and T. D. White, "Guidelines for Permitting Overloads; Part 1: Effect of Overloaded Vehicles on the Indiana Highway Network", 1994.
- [8] K. Chatti, D. Lee, and T. Kim, "Truck Damage Factors Using Dissipated Energy versus Peak Strains", 6th international Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, 2000, pp. 175-183.
- [9] M. E. Abdel-Motaleb, "Impact of high-pressure truck tires on pavement design in Egypt", Emirates Journal for Engineering Research, Vol. 12, No. 2, 2007, pp. 65-73.
- [10] R. Chaudry and A. B. Memon, "Effects of Variation in Truck Factor on Pavement Performance in Pakistan", Journal of Engineering and Technology, Vol. 32, No. 1, 2013, pp. 19-30.
- [11] L. F. Macea, L. Marquez, and H. LLinas, "Improvement of Axle Load Spectra Characterization by a Mixture of Three Distributions", Journal of Transportation Engineering, Vol. 141, No. 12, 2015.
- [12] F. Homsy, D. Bodin, S. Yotte, D. Breyse, and J. M. Balay, "Multiple axle loadings: Shape parameters and their effect on the fatigue life of asphalt mixtures", Europe Journal of Environment Civil Engineering, Vol. 15, No. 5, 2011, pp. 743-758.
- [13] D. Rys, J. Judycki, and P. Jaskula, "Determination of vehicles load equivalency factors for polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavement structures", Transportation Research Procedia, Vol. 14, 2016, pp. 2382-2391.
- [14] H. Zhang, M. Gong, and T. Yu, "Modification and application of axle load conversion formula to determine traffic volume in pavement design", International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 11, No. 6, 2018, pp. 582-593.
- [15] A. K. Singh and J. P. Sahoo, "Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach", Computer and Geotechnic, Vol. 117, No. April 2019, 2020.
- [16] Y. Deng, X. Luo, Y. Zhang, and R. L. Lytton, "Evaluation of Flexible Pavement Deterioration Conditions Using Deflection Profiles Under Moving Loads", Transportation and Geotechnic, 2020.

[۱۷] غلامعلی شفابخش، فریبرز فتحی و علی زایرزاده، "اولویت‌بندی اصلاح نقاط پرحادثه راه‌ها با کمک شبکه عصبی مصنوعی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۰، بهار ۸۹، صفحه ۷۱-۸۱.

- [۱۸] غلامعلی شفاابخش، حسین نادرپور و فاضل فصیحی، "انتخاب الگوریتم بهینه شبکه عصبی در تحلیل روسازی‌های انعطاف‌پذیر راه‌ها"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۱، تابستان ۸۹، صفحه ۴۵-۵۶.
- [19] H. Adeli, "Neural Networks in Civil Engineering: 1989–2000", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 16, No. 2, 2001, pp. 126–142.
- [20] S. Lee, "Application of Artificial Neural Networks in Geoinformatics" Basel, Switzerland, 2018.
- [21] J. Gajewski and T. Sadowski, "Sensitivity analysis of crack propagation in pavement bituminous layered structures using a hybrid system integrating Artificial Neural Networks and Finite Element Method", *Computational Materials Science*, Vol. 82, 2014, pp. 114–117.
- [22] I. Nunes, D. Hernane, R. A. Flauzino, L. H. Bartocci Liboni, and S. F. dos Reis Alves, "Artificial Neural Networks (A Practical Course)", Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [۲۳] محمد باقر منهاج، "مبانی شبکه‌های عصبی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ایران، ۱۳۹۷.
- [24] V. A. Profillidis and G. N. Botzoriz, "Modeling of Transport Demand", Elsevier, 2018.
- [25] I. L. Al-qadi, H. Wang, and E. Tutumluer, "Dynamic Analysis of Thin Asphalt Pavements by Using Cross-Anisotropic Stress-Dependent Properties for Granular Layer", *Transportation Research Board*, Vol. 2154.1, 2010, pp. 156–163.
- [26] Y. Chen, "Viscoelastic modeling of flexible pavement", Akron, 2009.
- [27] Z. A. Alkaissi, "Effect of High Temperature and Traffic Loading on Rutting Performance of Flexible Pavement", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 32, No. 1, 2020, pp. 1-4.
- [28] S. M. Zaghoul and T. White, "Use of a three-dimensional, dynamic finite element program for analysis of flexible pavement", *Transportation research record*, No. 1388, 1993.
- [۲۹] غلامعلی شفاابخش، حسین نادرپور و مانا معتمدی، "مدل سازی پاسخ بهینه روسازی آسفالتی به کمک روش اجزای محدود"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۹۵، صفحه ۳۳-۴۰.
- [30] Y. H. Huang, "Pavement Analysis and Design", 2nd Ed. Pearson Education, 2004.
- [31] M. Kim, "Three-Dimensional Finite Element Analysis Of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior", University of Illinois, 2007.
- [32] B. Zarei and G. A. Shafabakhsh, "Dynamic Analysis of Composite Pavement using Finite Element Method and Prediction of Fatigue Life", Vol. 04, No. June 2018, pp. 33–37.
- [33] D. Cebon, "Handbook of vehicle-road interaction", 1999.
- [34] A. Papagiannakis, T. N. A. Oancea, J. Chan, and A. T. Bergman, "Application of ASTM E1049-85 in Calculating Load Equivalence Factors from In Situ Strains", *Transportation Research Record*, Vol. 1307, 1991, pp. 82–89.
- [35] W. Uddin and S. Garza, "3D-FE modeling and simulation of airfield pavements subjected to FWD impact load pulse and wheel loads", *Airfield Pavements: Challenges and New Technologies*, 2004, pp. 304–315.
- [36] P. E. Sebaaly, N. Tabatabaee, B. Kulakowski, and T. Scullion, "Instrumentation for flexible pavements—Field performance of selected sensors", Federal Highway Administration, Washington DC, 1991.
- [37] J. E. Angus, "Criteria for choosing the best neural network", San Diego, 1991.