

## تخمین کریپ کمپلینس مخلوط های آسفالتی با استفاده از

### شبکه های عصبی مصنوعی

ابوالفضل حسنی<sup>۱\*</sup> و علی حیدری پناه<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری مهندسی عمران - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۷/۱۱/۲۱، تاریخ تصویب ۸۸/۴/۳۰)

### چکیده

یکی از آزمایش های اساسی در فرایند طراحی روسازی های انعطاف پذیر به روش مکانیستیک- تجربی در آشتو ۲۰۰۲، آزمایش کریپ کمپلینس است. در این تحقیق مدلی جدید برای تخمین کریپ کمپلینس مخلوط های آسفالتی با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه، با تکنیک آموزش لونیگ- مارکوات، با توان تعمیم پذیری  $R=0.949$ ، با موفقیت ارائه شده است. این مدل ۱۴ ورودی شامل درصد های عبوری انتخابی از منحنی دانه بندی و نیز درصد قیر، درجه نفوذ قیر در ۷۷ و ۱۱۵ درجه فازیته، اندیس نفوذ قیر و دمای آزمایش دارد. خروجی های مدل ۸ عدد شامل کریپ کمپلینس مخلوط آسفالتی در زمان های ۱۰۰، ۵۰، ۲۰، ۱۰، ۵، ۲ و ۱ ثانیه و نیز ضریب پواسون است. داده های مورد نیاز، به کمک تهیه برنامه های متعدد به زبان SQL، در محیط ACCESS 2000، از LTPP Database 2007 استخراج شده اند که شامل داده های ۹۷۵ آزمایش کریپ کمپلینس و نیز ۹۷۵ سری داده های آزمایش های مصالح سنگی مربوطه و نیز ۹۷۵ سری داده های آزمایش های قیر نظیر آنها می باشد

**واژه های کلیدی:** کریپ کمپلینس، شبکه های عصبی مصنوعی، طراحی مکانیستیک تجربی، آشتو ۲۰۰۲

### مقدمه

حساسیت پروژه و نیز امکان در دسترس بودن هزینه و تجهیزات فنی لازم برای انجام آزمایش های مورد نیاز انجام می گیرد. به طور کلی در فرایند طراحی روسازی در آشتو ۲۰۰۲، داده های ورودی بر حسب کیفیت، به سه سطح تقسیم می شوند [۵].

#### سطوح مختلف کیفی داده های ورودی مورد نیاز

##### برای طراحی روسازی در آشتو ۲۰۰۲

**سطح ۱:** در سطح ۱، پارامترهای ورودی لازم برای طراحی روسازی شامل خصوصیات مواد و مصالح، بالاترین کیفیت را داشته و به طور مستقیم توسط انجام آزمایش های آزمایشگاهی یا میدانی به دست می آیند. به عنوان مثال، کریپ کمپلینس مخلوط های آسفالتی، با انجام آزمایش کریپ تعیین می شود. ترافیک و بارگذاری نیز به کمک اندازه گیری های مستقیم در محل پروژه تعیین می شوند [۵].

**سطح ۲:** در این سطح، خصوصیات مصالح و عملکرد مخلوط های آسفالتی، به جای انجام آزمایش، با روابط تجربی که بر اساس رگرسیون به دست آمده اند، تخمین

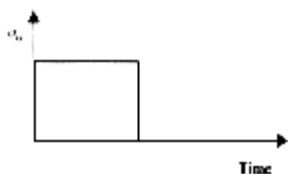
روش های مختلفی برای طراحی روسازی های انعطاف پذیر وجود دارد که به دو دسته تجربی و مکانیستیک- تجربی تقسیم می شوند. روش های طراحی روسازی آشتو تا قبل از سال ۲۰۰۲، بر اساس روش تجربی استوار بودند؛ این روش ها شامل آشتو ۱۹۶۷، ۱۹۸۶ و ۱۹۹۳ است که مبنای شکل گیری آنها معادلات طراحی تجربی به دست آمده از آزمایش بزرگ آشتو می باشد [۱]. اولین طرح تحقیقاتی که برای رشد و توسعه روش مکانیستیک- تجربی شکل گرفت و حمایت مالی شد، پروژه NCHRP 1-26 بود [۲]. روند بهبود و توسعه این روش طی پروژه NCHRP 1-37 ادامه یافت که نتیجه آن راهنمای طراحی روسازی های جدید و تعمیر شده به روش مکانیستیک- تجربی AASHTO 2002<sup>۲</sup> بود. شایان ذکر است که راهنمای آشتو ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۰۲ تکمیل نشده و روند بازبینی، بهبود و توسعه آن تا کنون ادامه دارد [۳ و ۴]. یکی از مهم ترین نکات قوت راهنمای طراحی مکانیستیک- تجربی آشتو ۲۰۰۲، قابلیت طراحی روسازی ها، با استفاده از داده های ورودی با سطوح کیفی مختلف است که انتخاب سطح کیفی مورد نظر، بر اساس

## کریپ کمپلینس Creep Compliance

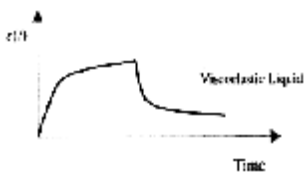
کریپ کمپلینس، از شاخص‌ترین پارامترهای معرف رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی است که در فرآیند طراحی روسازی به روش مکانیستیک- تجربی در آشتو ۲۰۰۲، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پروژه LTPP که از داده‌های آزمایشگاهی آن برای این تحقیق استفاده شده است، آزمایش کریپ کمپلینس بر اساس پروتوکل LTPP P07 انجام می‌شود [۷]. که طی آن، نمونه تحت تنش ثابت  $\sigma_0$  که بع صورت جانبی به نمونه وارد می‌شود قرار گرفته و کرنش  $\varepsilon(t)$ ، به عنوان تابعی از زمان، در زمان‌های مختلف، اندازه‌گیری می‌شود. نسبت کرنش  $\varepsilon(t)$ ، به تنش ثابت  $\sigma_0$ ، کریپ کمپلینس  $D(t)$  نامیده می‌شود [۸]:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (1)$$

پاسخ یک نمونه مخلوط آسفالتی، به بارگذاری کریپ در شکل (۲) نشان داده شده است.



الف: بارگذاری با تنش ثابت



ب: کرنش ایجاد شده

شکل ۱: رفتار کریپ در مواد ویسکوالاستیک [۷].

در این آزمایش از نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده یا کرگیری شده با قطر 100 mm برای مخلوط‌های آسفالتی که دارای حداکثر اندازه اسمی کمتر یا مساوی 37.5mm استفاده می‌شود. نمونه‌های ساخته شده قبل از آزمایش باید عمل‌آوری شده و در اون تحت aging، با استاندارد AASHTO PP2 قرار گیرند. [۷ و ۹].

در پروژه LTPP، کریپ کمپلینس در هفت زمان ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ ثانیه اندازه‌گیری شده است

زده می‌شود. به عنوان نمونه، کریپ کمپلینس مخلوط‌های آسفالتی به کمک روابط ۲ تا ۵ که در بخش مقاله ۳ ارائه شده است به دست می‌آید. یا مدول برجهندگی بستر یا اساس غیر چسبنده، به کمک روابط تجربی بر اساس CBR یا R-value تخمین زده می‌شود [۵].

**سطح ۳:** در این سطح از طبقه بندی‌های ملی یا محلی برای تخمین خصوصیات مصالح استفاده می‌شود. به عنوان نمونه با استفاده از سیستم طبقه‌بندی خاک‌ها در آشتو، می‌توان مدول برجهندگی را به طور تقریبی تخمین زد یا از طبقه بندی تیپ بارهای محوری، برای تخمین بار محوری نرمال شده استفاده کرد [۵].

در سال ۲۰۰۶ میلادی طی پروژه NCHRP 1-40 فرآیند طراحی روسازی به روش مکانیستیک آشتو ۲۰۰۲، به طور جامع مورد ارزیابی فنی و اقتصادی قرار گرفت. بر اساس این تحقیق، یکی از مشکلات طراحی روسازی به این روش، هزینه زیاد و زمان‌مند بودن آن می‌باشد که بخش عمده آن ناشی از انجام آزمایش‌هایی است که انجام آنها در سطح ۱، نیازمند تجهیزات گرانیقیمت و پرسنل آموزش دیده و خبره می‌باشد [۴]. از جمله اساسی‌ترین این آزمایش‌ها کریپ کمپلینس است که علاوه بر فرآیند طراحی مکانیستیک آشتو ۲۰۰۲ [۵ و ۹]، در ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در پروژه LTPP<sup>۳</sup> نیز، آزمایشی بنیادی محسوب می‌شود [۶].

شایان ذکر است که LTPP گسترده‌ترین پروژه ارزیابی رفتار مخلوط‌های آسفالتی است که از سال ۱۹۸۶ در آمریکا آغاز شده و همچنان ادامه دارد. بنابراین، تهیه و توسعه روابط درونیایی تجربی و یا مدل‌سازی آزمایش‌های گرانیقیمت ارزیابی عملکرد روسازی با سیستم‌های هوشمند که در سطح ۲ به جای انجام این آزمایش‌ها در سطح ۱، مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌تواند گامی مؤثر در کاهش هزینه‌ها و زمان و نیز تسهیل و امکان‌پذیر کردن فرآیند طراحی به روش مکانیستیک بخصوص در کشورمان ایران باشد. بر این اساس در این تحقیق با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدلی جدید برای تخمین کریپ کمپلینس مخلوط‌های آسفالتی، با موفقیت ارائه شده است.

$$Pen_{77} = 10^{290.5013 - \sqrt{81177.288 + 257.0694 \times 10^{(4 + 2.7297317TS)}}} \quad (5)$$

در این روابط:

$T$  = دمای آزمایش که ۰، ۱۰ و ۲۰- سانتی گراد است.  
 $V_a$  = فضای خالی مخلوط آسفالتی بر حسب در صد؛  
 $VFA$  = درصدی از فضای خالی بین سنگدانه ها که با قیر پر شده است و  $A_{RTFO}$  برابر با عرض از مبدا نمودار ویسکوزیته - دمای قیر بعد از آزمایش RTFO است،  
 $VTS$  = شیب منحنی ویسکوزیته - دمای قیر است.  
 باید توجه داشت که حداکثر مقدار  $m$  باید به مقدار 0.01 محدود شود [۵].

### مدل جدید تخمین کریپ کمپلینس مخلوط های آسفالتی

بتن آسفالتی مخلوطی از مصالح سنگی و قیر است و خصوصیات مصالح سنگی، بخصوص منحنی دانه بندی آن که نشان دهنده اسکلت سازه ای بتن آسفالتی است نقشی اساسی در رفتار و عملکرد بتن آسفالتی دارد، اما همان طور که در روابط ۶، ۷ و ۸ دیده می شود، در مدل ارائه شده در آشتو ۲۰۰۲، تاثیر دانه بندی مصالح سنگی، به عنوان اسکلت سازه ای، در کریپ کمپلینس در نظر گرفته نشده است و تنها خصوصیات قیر (مانند ویسکوزیته، درجه نفوذ،  $A_{RTFO}$  و  $VTS$ ) و خصوصیات وزنی- حجمی مخلوط آسفالتی (مانند  $V_a$ ،  $VFA$ ، ...) و نیز دمای آزمایش  $T$  و زمان بارگذاری  $t$ ، به عنوان عوامل مؤثر در کریپ کمپلینس مخلوط آسفالتی در نظر گرفته شده اند. بر این اساس، در این تحقیق، با در نظر گرفتن تأثیر منحنی دانه بندی مخلوط آسفالتی، یک مدل فیزیکی و ریاضی جدید برای پیش بینی کریپ کمپلینس مخلوط های آسفالتی ارائه شده است. این مدل ۱۴ ورودی دارد که در جدول (۲) ارائه شده اند. این ورودی ها شامل در صد های عبوری منحنی دانه بندی شامل در صد های عبوری از الک های ۱ اینچ، ۳/۴ اینچ، ۱/۲ اینچ، ۳/۸ اینچ، و الک های شماره ۴، ۱۰، ۴۰، ۸۰ و ۲۰۰ درصد قیر، درجه نفوذ قیر در ۷۷ و ۱۱۵ درجه فارنهایت، اندیس نفوذ قیر و دمای آزمایش است. این مدل دارای ۸ خروجی است که شامل کریپ کمپلینس در زمان های ۱، ۲، ۵،

[۴] و آزمایش در سه دمای ۰، ۱۰- یا ۲۰- سانتی گراد انجام می شود [۴]. استاندارد های مورد استفاده در این آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است [۲]. توضیحات بیشتر در مورد این آزمایش در مرجع [۹] ارائه شده است.

جدول ۱: استاندارد های مورد استفاده در آزمایش کریپ [۲].

AASHTO	Application
TP4	Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the SHRP Gyrotory Compactor
PP2	Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)
T67	Standard Practices for Load Verification of Testing Machines (cross-listed with ASTM E4)
T269	Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures

### مدل موجود تخمین کریپ کمپلینس در آشتو ۲۰۰۲

این مدل به کمک روش درون یابی به دست آمده است. برای تهیه داده های مورد نیاز، از آزمایش کریپ با بار گذاری چند مرحله ای تا زمان ۱۰۰ ثانیه استفاده شده است. برای این منظور از هر مخلوط آسفالتی سه نمونه جداگانه تهیه شده و روی هر کدام، در یک دمای مشخص، آزمایش کریپ انجام می شود. رابطه درون یابی برای تخمین کریپ کمپلینس مخلوط آسفالتی بدین ترتیب است که ضریب همبستگی آن  $R=0.89$  است [۱۰ و ۵]:

$$D(t) = D_1 \times t^m \quad (2)$$

که در این رابطه،  $t$  زمان بارگذاری بر حسب ثانیه و  $m$   $D_1$  پارامتر های شکست هستند و عبارتند از:

$$\log D_1 = -8.5241 + 0.01306T + 0.7975 \log V_a + 2.0103 \log VFA - 1.923 \log A_{RTFO} \quad (3)$$

$$m = 1.1628 - 0.00185T - 0.04596V_a - 0.01126VFA + 0.00247 Pen_{77} + 0.001683 Pen_{77}^{0.4605} T \quad (4)$$

جمع آوری و ذخیره حجم انبوه داده های جمع آوری شده از پروژه های LTPP، طراحی شده است. این پایگاه یک سیستم اطلاعاتی وابسته و مرتبط است که در بدو کار با نرم افزار Oracle 5 ساماندهی شد و بعد از آن به نرم افزار ناوربری Oracle 9i ارتقاء پیدا کرد. اما به دلیل هزینه زیاد، استفاده از این نرم افزار و در نتیجه قیمت زیاد سی دی های حاوی داده های LTPP که در محیط این نرم افزار ارائه شده بودند، در نسخه های بعدی، حجم بسیار عظیم داده ها به صورت خام و به صورت جدول های متعدد در محیط ACCESS 2000 ارائه شدند.

طیف بسیار وسیع داده های جمع آوری شده تا سال ۲۰۰۷ از حدود ۲۴۰۰ مقطع روسازی نیز در نسخه 2007 LTPP Database که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، به صورت انبوه جداول خام در محیط ACCESS 2000 ارائه شده اند و به دلیل استفاده نکردن از نرم افزار ناوربری مناسب در نسخه 2007 LTPP، که داده های LTPP از طریق آن قابل جایابی باشند، استخراج داده های مورد نیاز از این پایگاه، با تولید Database های متعدد انجام گرفته است. این مهم، با ارزیابی های گسترده ساختار پایگاه اطلاعاتی LTPP و تهیه برنامه های متعدد به زبان SQL در محیط ACCESS 2000 انجام شده است. و در نهایت نتایج مربوط به ۹۷۵ آزمایش کریپ کمپلینس و ۹۷۵ سری آزمایش های مصالح سنگی و ۹۷۵ سری آزمایش های قیر مربوط به نمونه های مخلوط های آسفالتی نظیر آنها، از پایگاه LTPP استخراج شده اند.

### مدل شبکه عصبی مصنوعی

همان طور که اشاره شد، دانه بندی مصالح سنگی نقش اسکلت سازه ای بتن آسفالتی را دارد. باید توجه داشت که در فرآیند مدل سازی یک آزمایش، تنها به دست آوردن ضریب همبستگی خوب کافی نیست و ارائه مدل فیزیکی مناسب اهمیت اساسی دارد. در مدل ارائه شده در آشتو ۲۰۰۲، هرچند که ضریب همبستگی خوب  $R=0.89$  به دست آمده است اما نقش دانه بندی مصالح سنگی که در پاسخ مخلوط آسفالتی به بارگذاری، اساساً نادیده گرفته شده است. در این تحقیق با لحاظ این نقش، مدل جدیدی برای تخمین کریپ کمپلینس ارائه شده است. این مدل ۱۴ ورودی دارد که شامل در صد های عبوری منحنی دانه بندی مصالح سنگی و نیز درصد و

۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ثانیه و ضریب پواسون است که در جدول (۳) ارائه شده اند. همان طور که در مرجع شماره ۲ اشاره شده است، خروجی های آزمایش کمپلینس، می تواند در زمان های مختلف اندازه گیری شود که در پروژه LTPP، این زمان ها لحاظ شده است.

### تهیه داده ها

#### پایگاه اطلاعاتی LTPP

طی دهه ۱۹۸۰، موسسه TRB<sup>۴</sup> وابسته به انجمن تحقیقات ملی، با حمایت مالی FHWA<sup>۵</sup> و همکاری AASHTO، مطالعات استراتژیک پژوهشی حمل و نقل STRS<sup>۶</sup>، را در زمینه ارزیابی خرابی بزرگراه های ملی و پل ها آغاز کرد. موسسه TRB برنامه استراتژیک تحقیقاتی بزرگراه ها SHRP<sup>۵</sup>، را با تمرکز بر تحقیق در زمینه توسعه و پیشرفت حمل و نقل بزرگراه ها پیشنهاد کرد. گزارش مطالعات انجام شده در سال ۱۹۸۴، در قالب گزارش ویژه TRB شماره ۲۰۲ با عنوان «پیشنهاد شش حوزه تحقیقاتی برای شتاب دهی تحقیقات و نوآوری در بزرگراه های آمریکا» منتشر شد. که برنامه ارزیابی عملکرد روسازی در دراز مدت (LTPP)، یکی از این حوزه ها بود. طی سال های ۱۹۸۵ تا ۱۹۸۶، پیمانکاران و گروه های تحقیقاتی مختلف طرح های تحقیقاتی خود را با جزئیات تشریح شده، برای برنامه SHRP<sup>۷</sup> ارائه کردند. طرح های تحقیقاتی تفضیلی در طی سال ۱۹۸۶ در قالب گزارش TRB با عنوان «برنامه استراتژیک تحقیقاتی بزرگراه ها- طرح های تحقیقاتی» منتشر شد.

برنامه LTPP، به عنوان یک طرح جامع برای پاسخ گویی به دامنه گسترده ای از اطلاعات مورد نیاز روسازی پایه ریزی شد. برای غلبه بر چالش های ناشی از مطالعات کوتاه مدت روسازی، پروژه LTPP، مطالعات دراز مدت روسازی را در دوره های ۲۰ ساله مد نظر قرار داده است. جمع آوری داده ها در زمینه های مختلف برای نیل به اهداف مورد نظر در راس اهداف LTPP قرار دارد. این داده ها از تقریباً ۲۴۰۰ مقطع روسازی در سراسر ایالات متحده آمریکا و در ۲۸ موضوع مطالعاتی روسازی جمع آوری شده اند.

#### استخراج داده ها از پایگاه اطلاعاتی LTPP

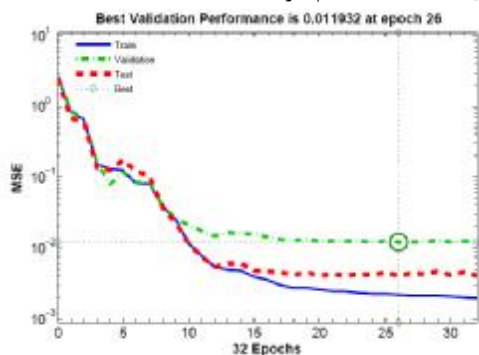
پایگاه ارزیابی عملکرد روسازی ها (LTPP) برای

برای نرون‌های لایه میانی از تابع انتقال تانژانت سیگموئید و نرون‌های لایه خروجی از تابع انتقال خطی استفاده شده است. جهت عملکرد بهتر شبکه، همه داده‌های ورودی و خروجی بین ۱ و -۱ نرمال شده‌اند. تمامی برنامه‌های مورد نیاز در محیط نرم افزار MATLAB R2008a تهیه شده است.

### آموزش و ارزیابی روند آموزش و توان شبیه سازی شبکه به صورت کلی

برای آموزش شبکه از الگوریتم انتشار به عقب لونیبرگ-مارکواد استفاده شده است. ویژگی قابل توجه و منحصر به فرد الگوریتم لونیبرگ-مارکواد این است که سرعت روش نیوتن را با تضمین همگرایی روش بیشترین کاهش، همراه می‌کند [۱۱].

از کل داده‌های موجود که ۹۷۵ سری است، ۶۰٪ آن یا ۵۸۵ داده برای آموزش و حدود ۲۰٪ آن یا ۱۹۵ داده برای ارزیابی توان شبیه سازی شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. برای ارزیابی روند آموزش شبکه و جلوگیری از آموزش بیش از حد<sup>۱</sup> و توقف آموزش در بهترین نقطه از نظر داشتن بیشترین توان شبیه سازی، ارزیابی<sup>۲</sup> روند آموزش به کمک ۲۰٪ از داده‌ها که ۱۵۶ سری داده است، انجام گرفته است.



نمودار ۱: روند آموزش و روند تغییرات خطاهای آموزش، ارزیابی و شبیه سازی شبکه.

روند آموزش شبکه در نمودار (۱) ارائه شده است. در این نمودار محور افقی نشان‌دهنده تعداد سیکل‌های آموزش (Epochs) و محور عمودی بیانگر میانگین مربعات خطا (MSE) می‌باشد. خط پیوسته، نحوه تغییرات خطای آموزش را با افزایش تعداد سیکل‌های آموزش، خط-نقطه نحوه تغییرات خطای ارزیابی با افزایش تعداد سیکل‌های آموزش و خط گسسته نحوه تغییرات خطای شبیه سازی

خصوصیات قیر مانند درجه نفوذ و... است که در جدول (۲) ارائه شده‌اند. خروجی‌های این مدل خروجی‌های آزمایش کریپ کمپلینس هستند که عبارتند از کریپ کمپلینس در زمان‌های ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ ثانیه و ضریب پواسون. بنابراین مدل ۸ خروجی دارد که در جدول (۳) این خروجی‌ها ارائه شده‌اند. بنابراین برای طراحی شبکه، با توجه به تعداد ورودی‌ها که ۱۴ عدد است، در لایه صفر ۱۴ نرون و با توجه به تعداد خروجی‌ها که ۸ عدد است، تعداد نرون‌های لایه خروجی ۸ عدد در نظر گرفته شده است. برای لایه میانی یا لایه پنهان، ۱۵ نرون در نظر گرفته شده است.

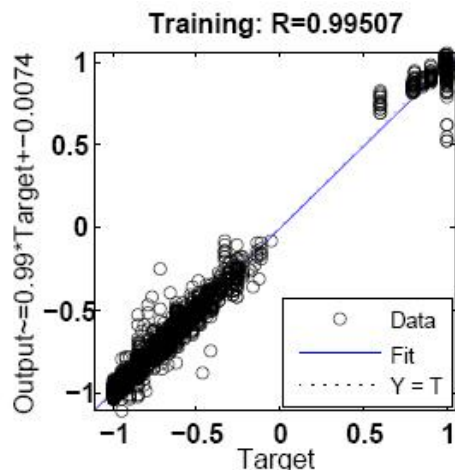
جدول ۲: ورودی‌های شبکه.

INPUTS (OVERALL)	INPUT #	NETWORK INPUTS
PERCENT PASSINGS FROM AGGREGATE GRADATION CURVE	1	ONE_PASSING
	2	THREE_FOURTHS_PASSING
	3	ONE_HALF_PASSING
	4	THREE_EIGHTHS_PASSING
	5	NO_4_PASSING
	6	NO_10_PASSING
	7	NO_40_PASSING
	8	NO_80_PASSING
	9	NO_200_PASSING
ASPHALT PROPERTIES & TEST TEMPERATURE	10	ASPHALT_CONTENT
	11	PENETRATION_77_F
	12	PENETRATION_115_F
	13	PENETRATION_INDEX
	14	TEST_TEMPERATURE

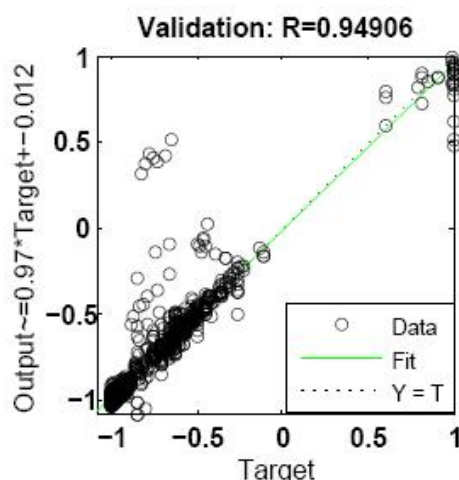
جدول ۳: خروجی‌های شبکه.

OUTPUTS (OVERALL)	OUTPUT #	NETWORK OUTPUTS
CRREP COMPLIANCE AT DIFFERENT TIMES	1	CREEP_COMP_1_SEC
	2	CREEP_COMP_2_SEC
	3	CREEP_COMP_5_SEC
	4	CREEP_COMP_10_SEC
	5	CREEP_COMP_20_SEC
	6	CREEP_COMP_50_SEC
	7	CREEP_COMP_100_SEC
POISSON COEFFICIENT	8	CREEP_POISSON_CALC

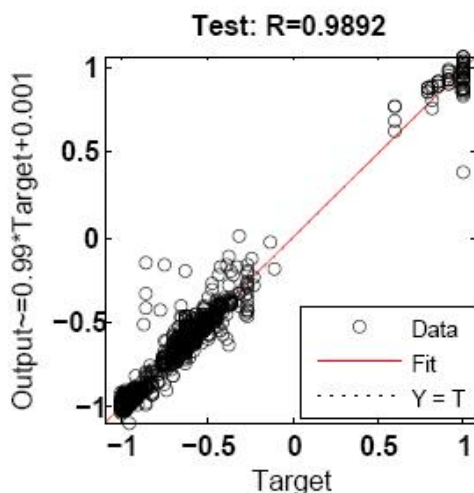
داده‌های ذکر شده به شبکه، ضریب همبستگی داده‌ها را  $R=0.9892$  به دست آمده است.



نمودار ۲: نتایج شبیه سازی داده های آموزش.



نمودار ۳: نتایج شبیه سازی داده های ارزیابی.

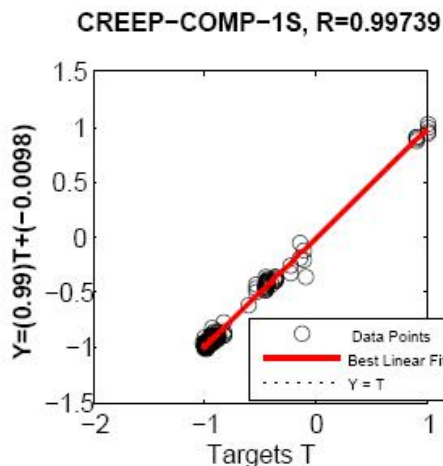


نمودار ۴: نتایج شبیه سازی داده های تست.

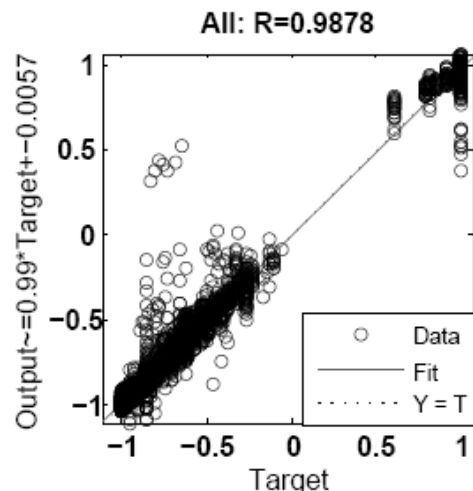
داده‌های جدید را با افزایش تعداد سیکل‌های آموزش نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش تعداد سیکل‌های آموزش، هر سه خط کاهش می‌یابند اما برای دستیابی به بیشترین توان شبیه‌سازی، بر اساس شبیه‌سازی داده‌های ارزیابی، روند آموزش در سیکل ۲۶ متوقف می‌شود که بهترین نقطه از نظر میزان آموزش شبکه می‌باشد. با ادامه آموزش هر چند که خطای آموزش (خط پیوسته)، کاهش می‌یابد، اما شبکه دچار آموزش بیش از حد شده و توان شبیه‌سازی آن برای داده‌های جدید کاهش می‌یابد.

پس از آموزش شبکه و دستیابی به بیشترین توان شبیه‌سازی، توانایی شبکه برای شبیه‌سازی داده‌ها ارزیابی شد. برای این منظور در هر مرحله، داده‌های مورد نظر شامل داده‌های آموزش، ارزیابی و تست به طور جداگانه و نیز در آخر به صورت یک‌جا، به عنوان متغیرهای ورودی به شبکه آموزش دیده ارائه شده و نتایج خروجی شبیه‌سازی شده توسط شبکه با مقادیر واقعی، به کمک انجام رگرسیون خطی مقایسه شده و نتایج به دست آمده در نمودارهای (۲) تا (۵) ارائه شده‌اند. در این نمودارها، محور عمودی، نشان‌دهنده خروجی‌های شبیه‌سازی شده توسط شبکه و محور افقی نشان‌دهنده مقادیر واقعی است. خط  $Y=T$  به صورت گسسته، خط برازش (Fit) به صورت پیوسته و داده‌ها توسط دایره کوچک نشان داده شده‌اند. برای هر نمودار، معادله رگرسیون و ضریب همبستگی محاسبه و ارائه شده است. بدیهی است که هر چه این ضریب به ۱ نزدیک‌تر باشد، توان شبیه‌سازی شبکه و مدل ارائه شده بالاتر است.

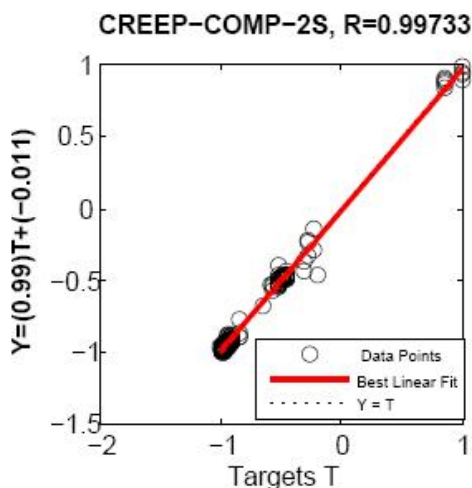
همان‌طور که در نمودار (۲) مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی برای شبیه‌سازی داده‌هایی که برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند  $R=0.99507$  به دست آمده است. برای ارزیابی توان شبیه‌سازی شبکه، ضریب همبستگی داده‌های ارزیابی و خصوصاً داده‌های تست نقش اساسی دارد. همان‌طور که در نمودارهای (۳) و (۴) دیده می‌شود، ضریب همبستگی برای داده‌های ارزیابی  $R=0.94906$  و برای داده‌های تست شبکه  $R=0.9892$  حاصل شده که بسیار خوب است و نشان‌دهنده موفقیت بسیار خوب مدل فیزیکی و نیز شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده برای شبیه‌سازی آزمایش کریپ کمپلینس در نهایت در نمودار (۵) با ارائه همه سه سری



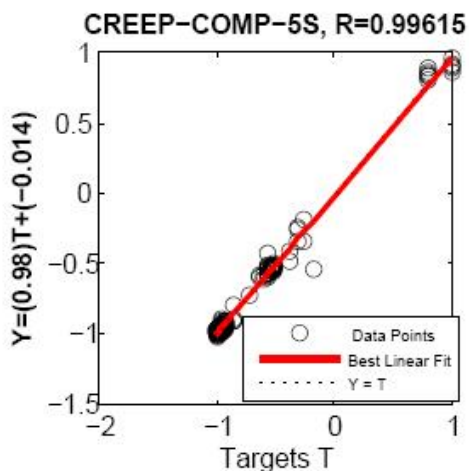
نمودار ۶: نتایج شبیه سازی CREEP\_COMP\_1\_SEC



نمودار ۵: نتایج شبیه سازی تمامی داده ها.



نمودار ۷: نتایج شبیه سازی CREEP\_COMP\_2\_SEC



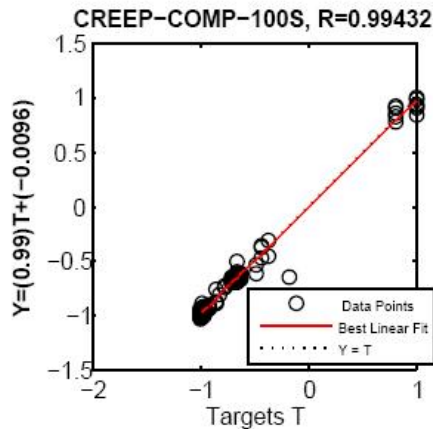
نمودار ۸: نتایج شبیه سازی CREEP\_COMP\_5\_SEC

### ارزیابی توان شبیه سازی شبکه برای هر یک از خروجی‌های آزمایش به طور جداگانه

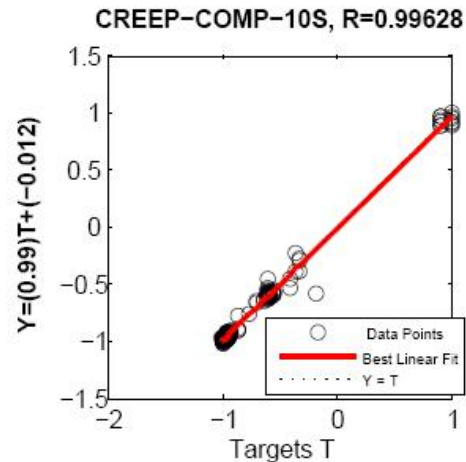
با توجه به موفقیت مدل فیزیکی جدید ارائه شده برای آزمایش کریپ کمپلینس و نیز موفقیت شبکه در شبیه سازی کلی داده‌ها، توان شبیه سازی شبکه برای هر یک از ۸ خروجی آزمایش به طور جداگانه ارزیابی شدند. برای این منظور ابتدا ۱۹۵ داده جدید به شبکه آموزش دیده ارائه و ۸ خروجی نظیر هر سری از این داده‌ها توسط شبکه شبیه سازی شده است. برای هر یک از خروجی‌ها به صورت جداگانه، برای مقادیر شبیه سازی شده و مقادیر واقعی نظیر آنها، رگرسیون خطی انجام شده است. نتایج به دست آمده و ضرایب همبستگی و معادلات رگرسیون مربوطه در نمودارهای (۶) تا (۱۳) ارائه شده است.

برای درک و مقایسه بهتر همه این نتایج در جدول (۳) جمع‌بندی و ارائه شده‌اند. در نمودارهای (۶) تا (۱۳) محور عمودی نشان‌دهنده مقادیر شبیه سازی شده توسط شبکه و محور افقی نشان دهنده مقادیر واقعی است. خط  $Y=T$  به صورت گسسته، خط برازش (Fit) به صورت پیوسته و داده‌ها توسط دایره کوچک نشان داده شده‌اند. برای هر نمودار، معادله رگرسیون و ضریب همبستگی محاسبه و ارائه شده است. بدیهی است که هر چه این ضریب به ۱ نزدیک‌تر باشد، توان شبیه سازی شبکه و مدل ارائه شده بالاتر است.

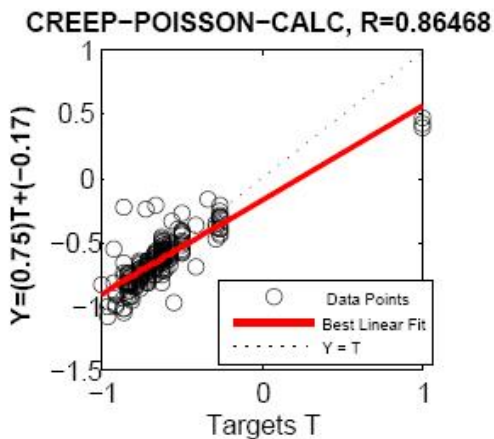




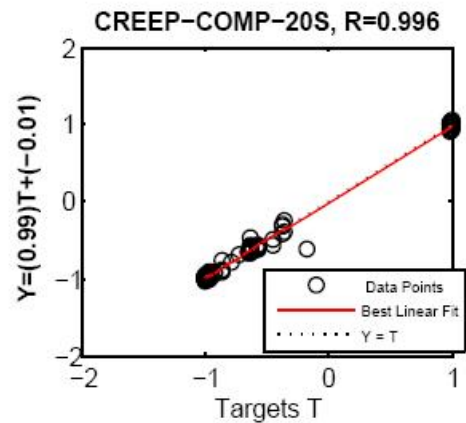
نمودار ۱۲: نتایج شبیه سازی  
.CREEP\_COMP\_100\_SEC



نمودار ۹: نتایج شبیه سازی  
.CREEP\_COMP\_10\_SEC



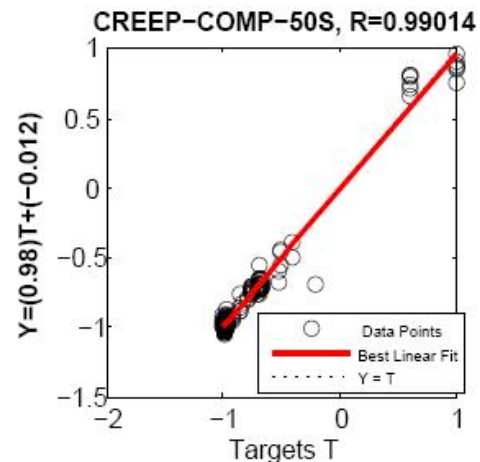
نمودار ۱۳: نتایج شبیه سازی  
.CREEP\_POISSON\_CALC



نمودار ۱۰: نتایج شبیه سازی  
.CREEP\_COMP\_20\_SEC

جدول ۴: نتایج شبیه سازی هر یک از خروجی های شبکه به طور جداگانه.

OUTP UT #	OUTPUT	R
1	CREEP_COMP_1_SEC	0.99739
2	CREEP_COMP_2_SEC	0.99733
3	CREEP_COMP_5_SEC	0.99615
4	CREEP_COMP_10_SE C	0.99628
5	CREEP_COMP_20_SE C	0.996
6	CREEP_COMP_50_SE C	0.99014
7	CREEP_COMP_100_SE C	0.99432
8	CREEP_POISSON_CA LC	0.86468



نمودار ۱۱: نتایج شبیه سازی  
.CREEP\_COMP\_50\_SEC



عنوان نمونه برای یک مخلوط آسفالتی، تاثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر خروجی‌های آزمایش کریپ کمپلینس توسط شبکه عصبی شبیه سازی شده است.

همان طور که در جدول (۵) دیده می شود، با تغییر این ورودی، در حالی که سایر ۱۴ ورودی شبکه ثابت نگه داشته شده اند، ۱۲ بردار ورودی به دست آمده است که در این جدول از ۱ تا ۱۲ شماره گذاری و ارائه شده اند. با ارائه این بردارها به شبکه عصبی مصنوعی T15P، بردارهای خروجی نظیر آنها توسط شبکه شبیه سازی شده است. و در نهایت چگونگی تغییرات هر یک از ۸ خروجی آزمایش با درصد عبوری از الک ۲۰۰ به طور جداگانه در نمودارهای (۱۴) تا (۲۱) ترسیم و ارائه شده است. با توجه به اینکه تعداد ورودی‌های شبکه ۱۴ و خروجی‌های شبکه ۸ عدد است، برای مدل سازی و ارزیابی تاثیر هر یک از ورودی‌ها بر هر یک از خروجی‌های شبکه،  $8 \times 14 = 112$  آنالیز حساسیت انجام شده که نتایج آن ۱۱۲ نمودار نظیر نمودارهای (۱۴) تا (۲۱) ارائه شده‌اند. اما به لحاظ محدودیت حجم مقاله تنها به ارائه نتایج مربوط به درصد عبوری از الک ۲۰۰ که شامل ۸ نمودار است، اکتفا شده است. با انجام آنالیز حساسیت با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده، با انتخاب مقادیر مناسب ورودی‌ها، امکان ساخت مخلوط آسفالتی با عملکرد مورد نظر فراهم می شود. بدین ترتیب از فرآیند سعی و خطا و انجام آزمایش های متعدد جلوگیری شده که گامی اساسی در جهت کاهش هزینه‌ها و زمان است.

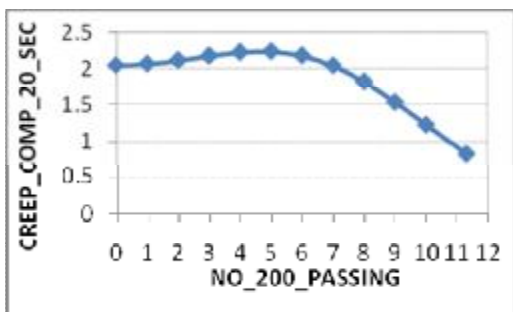
در جدول (۴) نتایج شبیه سازی هر یک از خروجی‌های شبکه که از نمودارهای (۸) تا (۱۳) استخراج و جمع بندی و ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، ضرایب همبستگی برای خروجی‌های کریپ کمپلینس در زمان های گوناگون که در اولین ستون جدول از سمت راست، در ردیف های ۱ تا ۷ جدول ارائه شده اند. همه این ضرائب مقداری بالاتر از ۰.۹۹ را دارند که حاکی از توان بسیار بالای شبکه در شبیه سازی همه خروجی‌های آزمایش کریپ کمپلینس است. ردیف ۸ جدول حاوی نتیجه محاسبه ضریب پواسون نمونه آسفالتی است که به عنوان یک گزینه اضافی در نظر گرفته شده است و مقدار ضریب همبستگی آن نیز  $R = 0.86468$  به دست آمده است که مناسب است.

### آنالیز حساسیت

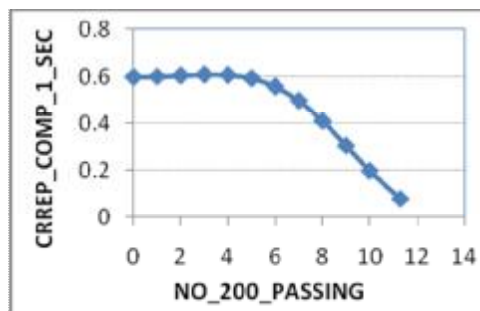
در این قسمت، تأثیر تغییرات هر یک از ورودی‌ها (جدول ۲)، بر هر یک از خروجی های آزمایش (جدول ۳) به طور جداگانه، به کمک انجام آنالیز حساسیت توسط شبکه عصبی، شبیه سازی شده است. برای این منظور، برای ورودی مورد نظر مقادیر مختلف در نظر گرفته می‌شود، در حالی که سایر ورودی‌ها ثابت نگه داشته شده اند؛ سپس بردارهای ورودی به دست آمده را به شبکه ارائه کرده و بردارهای خروجی نظیر آنها توسط شبکه، شبیه سازی می شوند. و در مرحله بعد، منحنی تغییرات هر یک از خروجی‌ها نسبت به ورودی مورد نظر ترسیم شده است. برای تشریح چگونگی انجام آنالیز حساسیت، به

جدول ۵: سری بردار های ورودی برای آنالیز حساسیت برای شبیه سازی تاثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰.

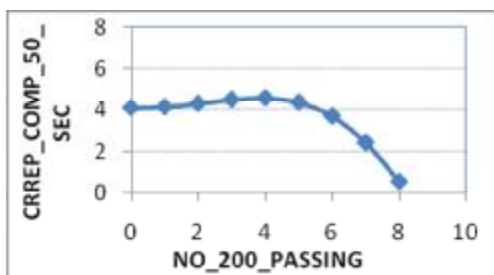
NPUTS	NAME OF GENERATED INPUTS FOR AN ASPHALT SPECIMEN											
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
TEST TEMPERATURE	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
ONE AND HALF PASSING	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ONE PASSING	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
THREE FOURTHS PASSING	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ONE HALF PASSING	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
THREE EIGHTHS PASSING	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
NO 4 PASSING	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
NO 10 PASSING	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
NO 40 PASSING	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
NO 80 PASSING	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<b>NO 200 PASSING</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11.3</b>
ASPHALT_CONTENT_MEAN	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
PENETRATION_77_F	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
PENETRATION_115_F	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144
PENETRATION_INDEX	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1



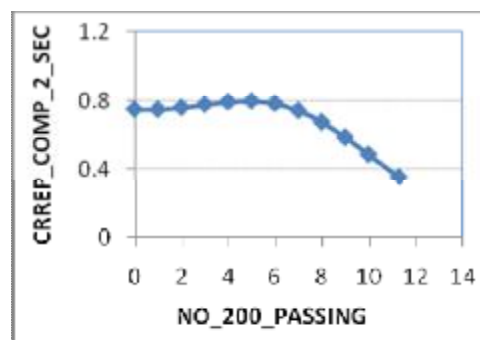
نمودار ۱۸: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CREEP\_COMP\_20\_SEC**



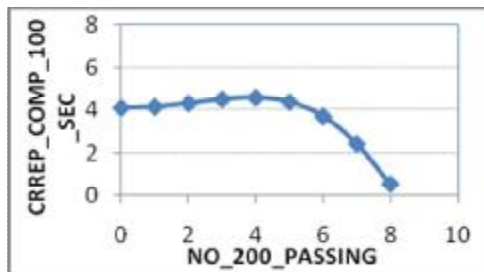
نمودار ۱۴: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_COMP\_1\_SEC**



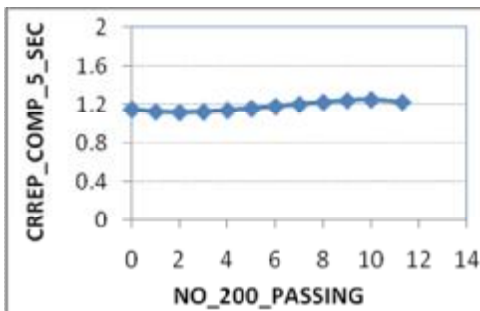
نمودار ۱۹: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_COMP\_50\_SEC**



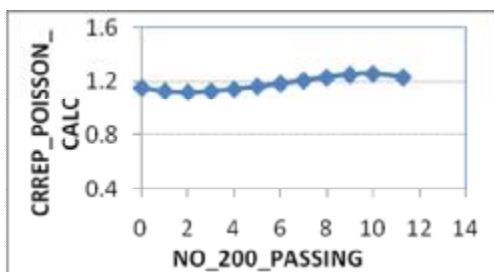
نمودار ۱۵: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_COMP\_2\_SEC**



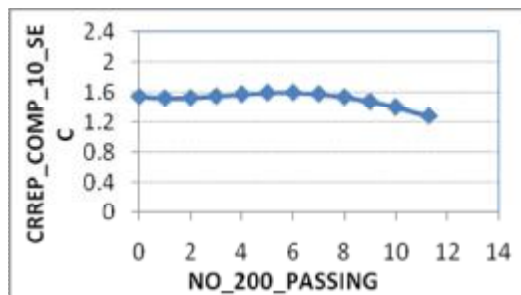
نمودار ۲۰: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_COMP\_100\_SEC**



نمودار ۱۶: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_COMP\_5\_SEC**



نمودار ۲۱: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_POISSON\_CALC**



نمودار ۱۷: شبیه سازی تأثیر درصد عبوری از الک ۲۰۰ بر **CRREP\_COMP\_10\_SEC**

### نتایج و تحلیل

الف - استخراج موفقیت آمیز داده های مورد نیاز  
 ۱- استخراج داده های مورد نیاز برای مدل سازی آزمایش کریپ کمپلیننس از پایگاه اطلاعاتی LTTP با برنامه

.CREEP\_COMP\_5\_SEC .CREEP\_COMP\_2\_SEC  
 .CREEP\_COMP\_20\_SEC .CREEP\_COMP\_10\_SEC  
 و CREEP\_COMP\_100\_SEC, CREEP\_COMP\_50\_SEC  
 ضرایب همبستگی آنها به ترتیب 0.99733, 0.99739, 0.99432, 0.99014, 0.996, 0.99628, 0.99615  
 و 0.86468 به دست آمده است که نشان از توان بسیار  
 خوب شبکه در مدل‌سازی خروجی‌ها دارد. ضریب  
 همبستگی به دست آمده برای خروجی هشتم که  
 CREEP\_POISSON\_CALC است، 0.86468 که مناسب  
 است. با توجه به برتری توانایی پیش بینی مدل ارائه شده  
 با ضریب همبستگی  $R=0.9892$  نسبت به مدل آشتو  
 ۲۰۰۲ که ضریب همبستگی آن  $R=0.89$  است و نیز  
 توانایی بسیار خوب شبکه در مدل‌سازی همه خروجی‌های  
 آزمایش کریپ کمپلینس با ضریب همبستگی بزرگ‌تر از  
 $R=0.99014$ ، مدل فیزیکی جدید ارائه شده دارای عملکرد  
 عالی بوده و مدل‌سازی آن با شبکه‌های عصبی مصنوعی با  
 موفقیت کامل انجام شده است. از آنجایی که ورودی‌های  
 مدل از ارزان‌ترین و راحت‌ترین و کم هزینه‌ترین آزمایش  
 های مصالح سنگی و قیر که دانه بندی مصالح سنگی و  
 درجه نفوذ قیر است به دست می‌آیند، یکی دیگر از  
 ویژگی‌های اساسی مدل ارائه شده، تخمین کریپ  
 کمپلینس‌های مخلوط آسفالتی با استفاده از ساده‌ترین و  
 ارزان‌ترین ورودی‌ها است. مزیت دیگر مدل شبکه عصبی  
 مصنوعی ارائه شده این است که محدوده همه ورودی‌ها  
 مشخص است در حالی که در مدل آشتو ۲۰۰۲ محدوده  
 ورودی‌ها مشخص نشده است. ضمن اینکه مدل شبکه  
 عصبی ارائه شده، توان تخمین ضریب پواسون را نیز با  
 ضریب همبستگی  $R=0.86468$  دارد و مدل درون‌یابی  
 آشتو ۲۰۰۲ این توانایی را ندارد.

برای طرح و تولید یک مخلوط آسفالتی با کریپ  
 کمپلینس‌های مورد نظر، به طور معمول از روش سعی و  
 خطا استفاده می‌شود که فرآیند آن مستلزم ساخت  
 نمونه‌های متعدد مخلوط‌های آسفالتی است که نیازمند  
 صرف زمان و هزینه زیاد است. در این تحقیق با ارائه  
 قابلیت انجام آنالیزهای حساسیت با استفاده از مدل شبکه  
 عصبی مصنوعی طراحی شده، این امکان فراهم شده است  
 که با انجام آنالیز حساسیت برای هر نمونه مخلوط  
 آسفالتی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه  
 شده، منحنی تغییرات هر خروجی مورد نظر نسبت به

نویسی و ساخت Database های متعدد، با موفقیت صورت  
 گرفته است. این مهم با ارزیابی و مطالعات گسترده در  
 زمینه ساختار پایگاه اطلاعاتی LTPP و تهیه برنامه های  
 متعدد به زبان SQL در محیط ACCESS 2000 انجام  
 شده است و در نهایت تایج مربوط به ۹۷۵ آزمایش کریپ  
 کمپلینس و ۹۷۵ سری آزمایش های مصالح سنگی  
 و ۹۷۵ سری آزمایش های قیر مربوط به نمونه های  
 مخلوط های آسفالتی نظیر آنها، از پایگاه LTPP استخراج  
 شده اند.

### ب- ارائه مدل فیزیکی جدید برای آزمایش کریپ کمپلینس و مدل‌سازی موفقیت آمیز آن با شبکه‌های عصبی مصنوعی

۲- در این تحقیق یک مدل فیزیکی جدید با لحاظ نقش  
 منحنی دانه بندی مصالح سنگی، برای آزمایش کریپ  
 کمپلینس ارائه شده است. برای مدل‌سازی این مدل، از  
 شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه پیشرو با ۱۵  
 نرون در لایه میانی و آگوریتم انتشار به عقب لوبنبرگ-  
 مارکوود استفاده شده است. همان طور که نمودار های (۱)  
 تا (۵) نشان می‌دهند. ضریب همبستگی برای شبیه سازی  
 داده های جدید  $R=0.9892$  و برای شبیه سازی داده‌های  
 ارزیابی  $R=0.94906$  به دست آمده است که نشان‌دهنده  
 طراحی و آموزش بسیار خوب و نیز توان بسیار خوب  
 شبکه در شبیه‌سازی داده‌های جدید می‌باشد. ضریب  
 همبستگی برای شبیه سازی داده های جدید  $R=0.9892$   
 است که از ضریب همبستگی مدل آشتو ۲۰۰۲،  $R=0.89$ ،  
 حدود ۹.۲٪ بیشتر می باشد. بنابراین مدل فیزیکی جدید  
 ارائه شده و شبیه سازی آزمایش کریپ کمپلینس بر اساس  
 آن با شبکه‌های عصبی مصنوعی با موفقیت انجام شده  
 است.

### ج- ارزیابی توان شبیه سازی شبکه برای هر یک از خروجی های آزمایش به صورت جداگانه

با توجه به نمودارهای (۶) تا (۱۳) و جدول (۳)، نتایج  
 به دست آمده برای ارزیابی توان شبکه برای شبیه سازی  
 خروجی‌های آزمایش به صورت جداگانه به این شرح است:  
 با توجه به ۸ نمودار از شماره (۶) تا (۱۳) که نتایج آنها در  
 جدول (۳) جمع‌بندی شده است، نتایج به دست آمده  
 برای ارزیابی توان شبکه برای شبیه سازی ۸ خروجی  
 آزمایش کریپ کمپلینس شامل CREEP\_COMP\_1\_SEC،

مکانیستیک حتی در کشورهای پیشرفته مانند آمریکا، هزینه گزاف انجام آزمایش‌های اساسی ارزیابی عملکرد روسازی است. با توجه به موفقیت مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده در این تحقیق، استفاده از آن در سطح ۲ آشتو ۲۰۰۲ برای تخمین کریپ کمپلینس‌های مخلوط‌های آسفالتی به جای انجام آزمایش، با کاهش هزینه‌ها و زمان، گامی اساسی و بلند در جهت امکان پذیر کردن طراحی روسازی به روش مکانیستیک بخصوص در کشورهایی که فاقد بودجه و تجهیزات مورد نیاز را ندارند، خواهد بود.

تغییرات هر یک از ورودی‌ها ترسیم شود. با داشتن این منحنی‌ها به عنوان ابزار کمکی، با تخمین حدودی درصد مصالح ورودی، امکان ساخت مخلوط آسفالتی با کریپ کمپلینس‌های نزدیک به رفتار مورد نظر را فراهم می‌سازند که گامی اساسی در جهت امکان پذیر کردن طرح و ساخت مخلوط‌های آسفالتی با رفتار مورد نظر و کاهش هزینه‌ها و زمان است.

همان‌طور که اشاره شد، با توجه به نتایج ارزیابی جامع فنی اقتصادی راهنمای آشتو ۲۰۰۲ طی پروژه NCHRP 1-40 که نتایج آن در سال ۲۰۰۶ ارائه شد یکی از بزرگ‌ترین موانع و مشکلات طراحی روسازی به روش

## مراجع

- 1 - AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structure*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- 2 - Huang, Y. H. (1992). *Pavement Analysis and Design*. Prentice-Hall, inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- 3 - NCHRP Project 1-37A, (2004). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- 4 - NCHRP Report, Research Results Digest 307, (2006). *Independent Review of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide and Software*. Transportation Research Board.
- 5 - *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Part 3. Design Analysis, Chapter 3. Design of New and Reconstructed Flexible Pavements*. (2004). Prepared for National Cooperative Highway research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Submitted by ARA, Inc., ERES Consultants Division, 505 West University Avenue, Champaign Illinois 61820.
- 6 - *Long-Term Pavement Performance Information Management System: Pavement Performance Database User Reference Guide*. (2006). Publication No. FHWA-RD-03-088, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- 7 - *LTPP Protocol P07: Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device*, Version 1.1. (2001).
- 8 - Papagiannakis, A. T. and Masad, E. A. (2007). *Pavement Design and Materials*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- 9 - NCHRP Report 465. (2002). *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. Transportation Research Board.
- 10 - *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, Appendix HH: Field Calibration of Thermal Cracking Model*. (2003). Prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Submitted by ARA, Inc., ERES Division 505 West University Avenue Champaign, Illinois 61820.
- 11 - Hagan Martin, T. and Demuth, Howard B. (2000). *Neural Network Design*. Mark Beale MHB, Inc. PWSwww.SID.ir

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - National Cooperative highway Research Program 1-26
- 2 - American Association of State Highway and Transportation Official
- 3 - Long Term Pavement Performance
- 4 - Transportation Research Board
- 5 - Federal Highway Administration
- 6 - American Association of State Highway Administration
- 7 - Strategic Highway Research Program
- 8 - Over fitting
- 9 - Validation