

کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی رفتار تورمی خاک‌های رسی

حامد کمک پناه^۱، سید شهاب الدین یثربی^۲، علی اکبر گلشنی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-خاک و پی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار بخش عمران، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۲/۸]

چکیده- در این پژوهش از قابلیت شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی رفتار خاک های متورم شونده رسی استفاده شده است. در این روش داده‌ها با استفاده از انواع آرایش شبکه های چند لایه پرسپترون، که از پرکاربردترین نوع شبکه های عصبی است مدل شده‌اند. نتایج حاصل از این شبکه‌ها بر اساس شاخص‌های ارزیابی معرفی شد و با یکدیگر مقایسه شده اند که منجر به انتخاب بهترین آرایش شبکه از لحاظ دقت و کاربرد شده است. لازم به گفتن است که پارامترهای رطوبت، اندیس خمیری، دانسیته خشک و درصد ریزدانه خاک به عنوان پارامترهای ورودی و پارامتر درصد تورم آزاد بعنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. از آنجاکه خاک‌های در نظر گرفته شده برای این شبکه از مناطق مختلفی انتخاب شده است، پس شبکه عصبی فوق قابلیت پیش بینی رفتار تورمی انواع خاک‌های رسی را دارد. همچنین برای آموزش سیستم شبکه های عصبی مورد پژوهش، از نتایج پژوهش‌های قبلی، داده‌های خام مهندسی مشاور ژئوتکنیک و پایان‌نامه‌های موجود در زمینه خاک‌های متورم شونده استفاده شده است.

واژگان کلیدی: تورم، خاکهای رسی، شبکه عصبی، پرسپترون

۱- مقدمه

خاکریزها ممکن است به ترک خوردگی و شکست جاده‌ها منجر شود [۶].

برای تقسیم بندی خاک‌های متورم شونده، روش‌های طبقه بندی متعددی ارائه شده است. در حال حاضر یک روش استاندارد واحد طبقه بندی وجود ندارد و روش‌های متعددی در اقصی نقاط جهان در این زمینه وجود دارد. نوعاً، این روش‌ها شامل استفاده از حدود اتربرگ و یا درصد رس خاک به منظور توصیف کیفی خاک از لحاظ وجود پتانسیل تورمی کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است. لیکن یکی از واحدهای طبقه‌بندی که کاربرد بیشتری نسبت به سایر طبقه‌بندی‌ها دارد، طبقه‌بندی سید و همکارانش (۱۹۶۲) است که خاک‌های با درصد تورم ۰٪ الی ۱/۵٪ را به عنوان پتانسیل تورم کم، ۱/۵

مشکل به دست آمده از خاک‌های متورم شونده، سالیانه در جهان، موجب وارد آمدن خساراتی بالغ بر ۴ میلیارد دلار می‌شود. این مبلغ معادل دو برابر خسارات ناشی از سیل و یا ناشی از زمین لغزه است. همچنین این مبلغ معادل بیش از ۲۰ برابر هزینه خسارات ناشی از زلزله برآورد شده است. این تغییرات حجمی خاک‌های رسی می‌توانند موجب افزایش جابه‌جایی‌های زمین شوند که باعث وارد آمدن خسارت به سازه‌ها می‌شود. ساختمان‌های کوتاه، به ویژه به واسطه جابه‌جایی‌های یاد شده در معرض خطر است، برای اینکه بیشتر وزن کافی برای مقاومت در برابر بالآمدگی خاک را ندارند. همچنین نشست‌های به دست آمده از انقباض

و شبکه مربوطه آن، همبستگی‌های ۹۴، ۹۰/۵ و ۹۲ درصد در شبکه به دست آورند [۴]. دو پژوهش دیگر در خارج از کشور اولی با عنوان مدل شبکه عصبی مصنوعی مداوم وابسته به زمان برای پیش بینی رفتار رس‌های متورم شونده، به وسیله‌ی باسما و همکاران (۲۰۰۳) برای پیش بینی فشار تورم در زمان‌های مختلف حین تورم رس‌ها به وسیله‌ی مدلی بنام شبکه عصبی مداومی SANN^۲ مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده است که به وسیله این نوع شبکه عصبی رفتار تورم وابسته به زمان رس‌ها مدل شود. پارامترهای ورودی این شبکه شامل دانسیته خشک، فشار اعمال شده اولیه، درصد رطوبت خاک، درصد رس، اندیس خمیری و فشار تورم در زمان t بوده و شبکه اطلاعات ورودی فوق را برای تعیین فشار تورم در زمان $t+1$ پردازش می‌کند. خروجی شبکه نیز تعیین فشار خالص در بازه زمان‌های مختلف پس از شروع تورم است. همچنین ضریب همبستگی نهایی این شبکه ۰/۹۷۵ بوده است [۵]. پژوهش دیگر با موضوع پیش بینی فشار تورم خاک‌های متورم شونده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، به وسیله‌ی محمد زین و همکاران (۲۰۰۶) برای پیش بینی فشار تورم خاک‌های رسی با استفاده از شبکه عصبی MLP^۳ انجام یافته است. در این پژوهش از رطوبت طبیعی خاک، حد روانی، حد خمیری و درصد ریزدانه خاک به عنوان پارامترهای ورودی و فشار تورم نهایی نیز به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است و پژوهشگران به یک همبستگی ۹۴/۵ درصد دست یافتند و شبکه عصبی MLP را بعنوان یک روش مناسب غالب بر روابط تجربی تورم تشخیص دادند [۶].

۲- هدف از پژوهش و کاربرد آن

هدف از این پژوهش، ارائه یک برنامه کامپیوتری (تحت نرم افزار مهندسی MATLAB) است که بتواند با دریافت نتایج یک سری آزمایش‌های اولیه و پایه ژئوتکنیکی، مقدار درصد تورم خاک‌های رسی را با بیشینه دقت واقعی پیش‌بینی نماید.

تا ۵ درصد را پتانسیل تورم متوسط، ۵ تا ۲۵ درصد را پتانسیل تورم زیاد و بیش از ۲۵ درصد را به عنوان پتانسیل تورم خیلی زیاد طبقه‌بندی نموده است [۱].

"شبکه‌های عصبی مصنوعی" جزو دسته‌ای از سیستم‌های دینامیکی هستند که رابطه نهفته در کالبد داده‌های تجربی را می‌یابند و به این دلیل به این سیستم‌ها هوشمند می‌گویند. شبکه‌های عصبی مصنوعی بر اساس محاسبه روی داده‌ها یا نمونه‌ها، قوانین کلی را فرا گرفته و برای پیش بینی وقایع آتی مورد استفاده قرار می‌دهند [۲].

هدف از این پژوهش، ارائه راهکاری جدید برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های متورم‌شونده رسی است. برای این منظور از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی رفتار یک پدیده را از نتایج آزمایشگاهی و تجربی به شکل مستقیم می‌آموزند، در نتیجه نیازی به تعریف ثوابت و پیش‌فرض‌ها ندارند. از آنجا که رفتار خاک‌های متورم شونده رسی، یک رفتار پیچیده است، استفاده از شبکه عصبی به عنوان روشی که می‌تواند رابطه حاکم بر محیط را بیاموزد، ایده‌آل به نظر می‌رسد.

پس از جستجوهای فراوان در مورد تاریخچه کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در شناسایی و پیش‌بینی رفتار تورم خاک‌های رسی، مشخص شد با اینکه پژوهش‌های بسیار فراوانی راجع به شناسایی تورم رس به صورت آزمایشگاهی وجود دارد، لیکن کلاً سه پژوهش با زمینه شبکه‌های عصبی مورد مطالعه قرار گرفته است که در میان آنها یک پژوهش در داخل کشور با موضوع مدل‌سازی فشار تورمی سیکلی رس و گل‌سنگ^۱ (نوعی سنگ رسوبی است که منشا آن رس و سیلت است) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در نیروگاه مسجد سلیمان ایران به وسیله‌ی موسوی و همکاران (۲۰۰۶) انجام شده است. در این پژوهش مولفین توانستند با یک آرایش شبکه عصبی تاخیر زمانی به هم پیوسته که در آن فشار تورم، بارندگی و تعداد سیکل‌های تورم به عنوان پارامتر ورودی و فشار نهایی تورم بعنوان پارامتر خروجی تعریف شده بود، مابین داده‌های هر ایستگاه

2. Sequential Artificial Neural Networks (SANN)
3. Multi Layer Perception (MLP)

1. Mudrock

۴- بانک اطلاعاتی مدل

اطلاعات جمعاً از ۱۴ نقطه کشور که دارای خاک‌های رسی متورم شونده متوسط تا زیاد است، جمع آوری شده است. بانک اطلاعاتی در ابتدا شامل ۱۴۲ ردیف داده و شامل نتایج آزمایشگاهی درصد ریزدانه، درصد رس، درصد رطوبت اولیه، حد خمیری، حد روانی، اندیس خمیری، چگالی نسبی، وزن مخصوص طبیعی و خشک، دانسیته خشک و درصد تورم آزاد بر گرفته از آزمایش استاندارد ASTM D-4546 بوده است. پس از حذف داده‌های غیر قابل اعتماد که به نظر می‌رسید با واقعیت سازگاری ندارند و باعث احتمال ایجاد انحراف در آموزش و یادگیری شبکه می‌شود، در پایان ردیف داده‌های ناقص نیز حذف شد. منظور از ردیف داده‌های ناقص، ردیف‌هایی است که همه ستون‌های داده آن پرنباشد، چرا که شبکه عصبی عمل برازش از منحنی در فضای n بعدی را انجام می‌دهد و تمامی مولفه‌ها در این برازش نقش دارند، اگر چه می‌توان با آنالیز حساسیت میزان نقش آن‌ها را در یک مساله خاص بررسی کرد. با در نظر گرفتن شرایط داده‌ها بعد از حذف ردیف‌های غیر قابل اعتماد و ناقص، در کل ۱۰۴ ردیف داده کامل معمولاً ۵ تا ۳۰ درصد کل داده‌ها برای آزمایش شبکه در نظر گرفته می‌شود [۸]. در این پژوهش تقریباً ۱۵ درصد داده‌ها برای آزمایش شبکه منظور شده و در کل از ۱۰۴ ردیف داده باقی مانده، ۹۰ ردیف برای آموزش^۱ و ۱۴ ردیف برای آزمایش شبکه^۲ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به توضیح است که این انتخاب‌ها باید به صورت کاملاً تصادفی باشد، زیرا که این انتخاب، باید کل بازه داده‌ها را پوشش دهد. شبکه عصبی می‌تواند برای نمونه-های ورودی که در آموزش شبکه استفاده نشده‌اند و شبکه آنها را ندیده است، خروجی مطلوبی را ارائه دهد که این خاصیت شبکه عصبی را تعمیم می‌گویند.

۵- پارامترهای ورودی و خروجی

در این پژوهش برای پارامترهای ورودی سعی شده است از پارامترهایی که نقش بیشتری در ایجاد عوامل تورم دارد،

از آنجایی که انجام آزمایش‌ها تورم برای یک پروژه نسبتاً بزرگ، زمانبر و هزینه‌بر است، پژوهش حاضر این قابلیت را ایجاد می‌کند که در زمین‌های مشکوک به تورم زیاد، با روش نرم افزاری این پژوهش، ابتدا مقادیر احتمالی تورم که به واقعیت خیلی نزدیک است، در اسرع وقت و با هزینه بسیار اندک به دست آید. سپس در صورت بالا بودن میزان تورم به دست آمده از روش نرم افزاری، مطالعات ژئوتکنیکی تکمیلی تورم در پروژه، انجام شود.

۳- روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی تورم

هدف از انجام آزمایش تورم، اندازه‌گیری تغییر ارتفاع یک نمونه به ابعاد مشخص، در اثر افزایش درصد رطوبت تحت سربار خاص است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D-4546 انجام می‌شود و به سه روش زیر قابل اندازه‌گیری است [۷]:

روش A: در این روش نمونه تحت سرباری ناچیز (کمینه ۱ کیلوپاسکال) خیسانده می‌شود تا تورم نماید. پس از به پایان رسیدن تورم اولیه نمونه بارگذاری می‌شود تا ارتفاع (نسبت تخلخل) اولیه آن تامین شود.

روش B: در این روش نمونه پیش از خیسانده شدن، تحت فشار سربار مشخصی (برای نمونه معادل با فشار سربار سازه روی خاک) تحکیم می‌شود. سپس نمونه در سربار مربوطه در تماس با آب قرار می‌گیرد و مقدار تورم یا نشست در سربار مربوطه اندازه‌گیری می‌شود.

روش C: در این روش نمونه در تماس با آب قرار می‌گیرد ولی از تورم آن جلوگیری می‌شود. به این ترتیب فشار تورم در حجم ثابت اندازه‌گیری می‌شود. پس از به تعادل رسیدن نمونه، آزمایش تحکیم (مطابق ASTM D-2435) قابل انجام است [۷].

در این پژوهش، تمامی اطلاعات جمع‌آوری شده، نتایج آزمایش‌ها است که با روش A برای اندازه‌گیری تورم آزاد، از مجموعه دستگاه تحکیم استفاده شده است با این تفاوت که چون نیازی به بارگذاری نمونه نبوده، بازوی اعمال بار روی نمونه‌ها قرار نگرفته است [۳].

همچنین برای بررسی و مقایسه میزان زمان پردازش شبکه‌ها، فقط از یک کامپیوتر مشخص با مشخصات سخت افزاری ثابت استفاده شده است، تا در مقایسه زمان‌های پردازش خطایی وارد نشود.

۷- ساختار شبکه عصبی برای مساله مورد نظر

تعداد گره‌های لایه پنهان و همچنین تعداد لایه‌های پنهان از طریق سعی و خطا به دست می‌آید. در حقیقت تعداد مناسب گره‌ها و لایه‌های پنهان، وقتی به دست می‌آید که شبکه بهترین جواب را ارائه دهد [۸].

هر واحد در لایه پنهان یک تابع پایه شعاعی^۱ مانند یک هسته گاوسی^۲ را به عنوان تابع فعالسازی به کار می‌برد، درحالی که واحدهای خروجی تابع همانی^۳ را به عنوان تابع فعالسازی به کار می‌برند. مرکز این تابع پایه شعاعی (یا تابع هسته) با بردار وزن هر واحد مشخص می‌شود و موقعیت و عرض این هسته‌ها باید از الگوهای آموزشی یاد گرفته شود [۲].

الگوریتم‌های یادگیری مختلفی برای شبکه RBF وجود دارد. یک راه ساده یادگیری ترکیبی است که تخمین درباره موقعیت و عرض هسته را با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی بدون نظارت انجام می‌دهد. در این روش با استفاده از مجذور متوسط کمینه، وزن‌های اتصال بین لایه‌های پنهان و لایه‌های خروجی تعیین می‌شود. چون واحدهای خروجی خطی است، از یک الگوریتم غیرتکراری استفاده شده و بعد از اینکه این راه‌حل اولیه به دست آمد، یک الگوریتم باناظر برای تصحیح پارامترهای شبکه به کار گرفته می‌شود [۲].

نکته قابل توجه بین دو آرایش شبکه یاد شده در این است که الگوریتم یادگیری ترکیبی برای آموزش شبکه‌های RBF بسیار سریع‌تر از آرایش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه MLP است. اما، در بیشتر موارد، شبکه RBF شامل تعداد زیادی از واحدهای پنهان است که در نتیجه سرعت زمان اجرای شبکه RBF (بعد از آموزش) بسیار کندتر از سرعت اجرای شبکه پرسپترون چندلایه MLP است [۸].

استفاده شود و همچنین این پارامترها جزو پارامترهایی باشند که در آزمایشگاه‌های ژئوتکنیک به عنوان آزمایش‌های پایه روی خاک‌های رسی انجام می‌گیرد.

پس از شناسایی پارامترهای موثرتر بر عوامل تورم، درصد ریزدانه خاک (درصد خاک عبوری از الک ۲۰۰)، درصد رطوبت اولیه W (%)، اندیس خمیری PI (%) و دانسیته خشک خاک γ_d (KN/m^3) به عنوان پارامترهای ورودی شبکه و همچنین درصد تورم آزاد S_w (%) بعنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شده است.

در پژوهش انجام شده ابتدا به جای ورودی "درصد ریزدانه" (ذرات خاک ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی متر) در نظر بود که از ورودی "درصد رس" (ذرات خاک ریزتر از ۰/۰۰۲ میلی متر) به دست آمده از نتایج آزمایش هیدرومتری استفاده شد. زیرا بخش اعظم درصد ریزدانه را سیلت‌ها تشکیل می‌دهند که هیچ نقشی در ایجاد تورم ندارند و این به خودی خود باعث ایجاد خطا در شبکه می‌گردد. پس در مدلی آزمایشی از آرایش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه MLP استاتیکی نیز به جای ورودی درصد ریزدانه، از درصد رس با فقط ۳۰ ردیف داده استفاده شد و ضریب همبستگی ۰/۹۸۱۱ به دست آمد. لیکن چون در آزمایش‌های کلی ژئوتکنیک، آزمایش هیدرومتری عموماً برای درصد کمی از خاک‌های ریزدانه (عموماً بین ۱۰ تا ۲۰ درصد) انجام می‌شود، به دلیل کاهش چشمگیر داده‌ها و همچنین غیر کاربردی کردن رسالت این پژوهش در پروژه‌های مهندسی، ترجیح داده شد که از داده‌های ریزدانه به جای داده‌های درصد رس به عنوان ورودی شبکه استفاده شود.

۶- نرم افزار مورد استفاده

برای پیاده سازی طرح بالا در شبکه عصبی مصنوعی از نرم افزار (MATLAB R2007a (Ver. 7.4) و جعبه ابزار شبکه عصبی آن استفاده شده است. جعبه ابزار این نسخه از نرم افزار، نسبت به نسخه‌های قبلی کاراتر و راحت‌تر است و نیز سرعت آموزش و آنالیز نیز در این نسخه بالاتر از نسخه‌های پیشین است.

1. Radial Basis Function
2. Gaussian Kernal
3. Identity Function

تصحیح پخش متغیرهای ورودی و خروجی به شکلی است که خطای مدل‌سازی شبکه کم شود و به روش انتقال خطی مرسوم است:

$$NP = \frac{UB - LB}{MaxP - MinP} \times (SP - MinP) + LB \quad (1)$$

که در این رابطه، UB و LB دو حد بالایی و پایینی بازه مورد نظر، MinP، MaxP مقدار کمینه و بیشینه داده در بانک اطلاعات مدل و SP و NP مقدار داده خام و نرمالیزه شده است.

رابطه انتقال دیگری که استفاده می‌شود، روش میانگین-انحراف معیار است. در این روش داده‌های خام با توجه به ویژگی‌های آماری آن‌ها به گونه‌ای نرمالیزه می‌شوند که میانگین داده‌ها صفر و انحراف از معیار آنها یک شود:

$$NP = \frac{SP - MeanP}{StdP} \quad (2)$$

در این رابطه، MeanP و StdP به ترتیب میانگین و انحراف از استاندارد داده مورد نظر است.

پیش‌پردازش و پس‌پردازش آموزش در این پژوهش نیز با چهار پارامتر میانگین نسبت خروجی‌های شبکه به مقادیر واقعی (Avg)، بیشینه‌ی نسبت خروجی‌های شبکه به مقادیر واقعی (Max)، کمینه‌ی نسبت خروجی‌های شبکه به مقادیر واقعی (Min) و انحراف از معیار نسبت خروجی‌های شبکه به مقادیر واقعی (Stdev) کنترل شده است.

چگونگی کنترل به صورتی است که در طول فرآیند آموزش، با زیاد شدن تکرار آموزش، باید مقادیر میانگین، بیشینه و کمینه به عدد یک نزدیک و مقدار انحراف معیار کاهش یابد و روند تغییرات این چهار کمیت برحسب تعداد آموزش باید هماهنگ باشد. البته در تکرارهای اولیه ناهماهنگی مشاهده می‌شود، اما مشاهده رفتار نامتناسب در آموزش‌های بیشتر نشان دهنده دور شدن شبکه از مقادیر واقعی است. شکل‌های ۱ الی ۴، نمودار تغییرات این چهار کمیت را در طول فرآیند آموزش شبکه این پژوهش نشان می‌دهد [۳].

در آرایش شبکه MLP به کار رفته در این طرح، از تابع تحریک تانژانت هیپربولیک برای لایه میانی و تابع تحریک خطی برای لایه خروجی استفاده شده است. تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی معمولاً به وسیله طبیعت مساله مشخص می‌شود که در حقیقت همان تعداد پارامترهای ورودی و خروجی است. در مورد تعداد لایه‌های میانی باید توجه کرد که هرچه تعداد لایه‌های میانی بیشتر باشد، قدرت تجزیه و تحلیل شبکه بالاتر می‌رود اما از طرفی نیز سرعت کار شبکه نیز پایین می‌آید. لیکن در این پژوهش برای نیل به بهینه‌ترین حالت، شبکه با تعداد نرون‌های مختلف و لایه میانی متعدد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۸- توابع تحریک مورد استفاده

با توجه به جعبه ابزار نرم افزار MATLAB، یک شبکه عصبی که دارای تابع تحریک سیگموئیدی برای لایه میانی و تابع تحریک خطی برای لایه خروجی باشد، توان تقریب هر تابعی را با تعداد ناپیوستگی محدود دارد. اما برای بررسی بیشتر در شبکه‌های طراحی شده، از هر سه تابع تانژانت هیپربولیک، سیگموئیدی و خطی در لایه‌های پنهان و خروجی استفاده شده است.

۹- پیش‌پردازش و پس‌پردازش نمونه‌های آموزشی

علاوه بر اهمیت تعداد داده‌های یادگیری، توزیع داده‌ها نیز بسیار مهم است. از آنجایی که غالباً شبکه‌های عصبی نمی‌توانند با برونمایی به جواب مساله برسند بنابراین لازم است که الگوهای یادگیری طوری ارائه شوند که مرزهای محدوده مساله را در تمام ابعاد شامل شوند. به عبارت دیگر شکل محدوده مساله با محدوده یادگیری هماهنگ باشد. همچنین تمرکز دادن به یادگیری‌ها در محل‌هایی که شکل راه حل مساله پیچیدگی بیشتری دارد سودمند خواهد بود [۹].

همچنین با توجه به محدوده عمل توابع فعالیت، انتقال متغیرهای خروجی و ورودی به بازه مناسب با یک توزیع مناسب لازم به نظر می‌رسد. مهم‌ترین هدف از این انتقال،

پرکاربردترین و دقیق‌ترین شاخص در ارزیابی شبکه‌های عصبی است، مورد استفاده قرار گرفته است.

این شاخص نشان دهنده درجه ارتباط بین دو متغیر است. ضریب همبستگی بین x, y به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$R = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

که در آن \bar{x} و \bar{y} میانگین x و y در مجموعه داده‌ها است. مقادیر بالای R نشان دهنده ارتباط قوی بین متغیرها در دو مجموعه داده است و در مقابل مقدار R پایین، ارتباط ضعیف و یا عدم ارتباط بین دو مجموعه را نشان می‌دهد.

اسمیت (۱۹۸۶) محدوده زیر را برای ارزیابی R بین صفر و یک پیشنهاد کرد [۱۰]:

همبستگی قوی بین دو دسته متغیر وجود دارد:

$$|R| \geq 0.8$$

همبستگی بین دو دسته داده وجود دارد:

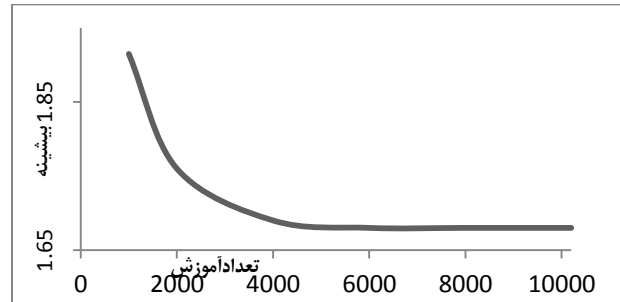
$$0.2 < |R| < 0.8$$

همبستگی بسیار ضعیف بین دو دسته داده وجود دارد:

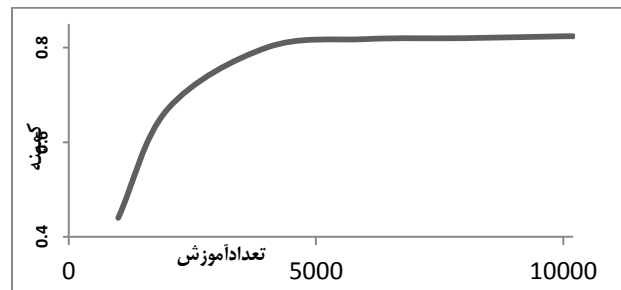
$$|R| \leq 0.2$$

۱۱- پردازش شبکه عصبی تورم آزاد و نتایج آن

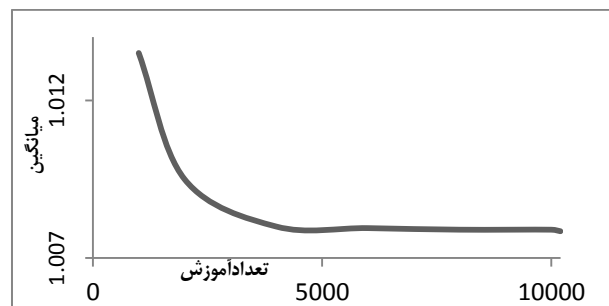
با توجه به جدول ۱، برای شبکه تورم آزاد ۶۴ بار پردازش با انواع معماری و آرایش شبکه به همراه انواع توابع محرک انجام گرفته است اما در اینجا برای نمونه نتایج ۶ پردازش آن ارائه می‌شود. در جدول یاد شده برای مقایسه، نوع شبکه، تعداد لایه‌های میانی شبکه، تعداد نرون هر لایه میانی، نوع توابع تحریک در لایه‌های میانی و لایه خروجی، تعداد دفعات آموزش مناسب انجام شده، مدت زمان آموزش، مدت زمان تست شبکه، کل زمان پردازش شبکه و همبستگی داده‌ها (R^2) نشان داده شده است [۳]. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان به ترتیب، آرایش و نتایج همبستگی میان جواب‌های شبکه با مقادیر آزمایشگاهی این شبکه، که به عنوان بهترین گزینه ارزیابی نهایی انتخاب شده است را مشاهده نمود.



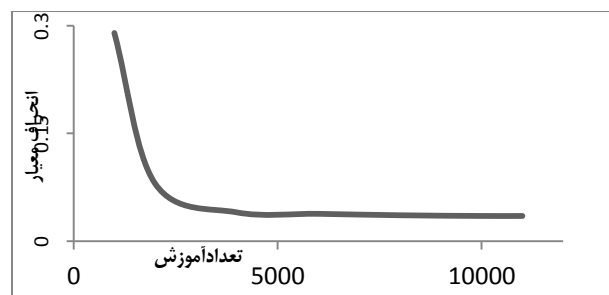
شکل ۱: تغییرات بیشینه در طول فرآیند آموزش



شکل ۲: تغییرات مقادیر کمینه در طول فرآیند آموزش



شکل ۳: تغییرات مقادیر میانگین در طول فرآیند آموزش



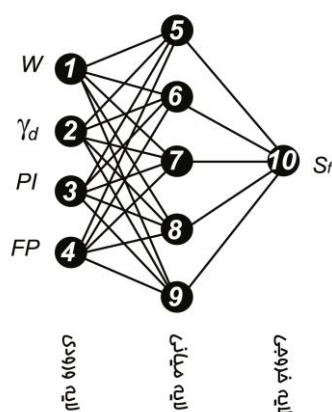
شکل ۴: تغییرات انحراف معیار در طول فرآیند آموزش

۱۰- ارزیابی شبکه طرح شده

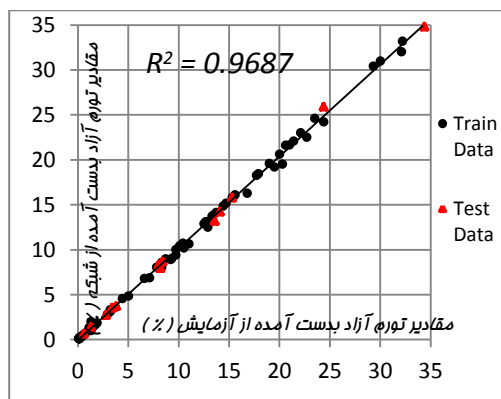
برای مقایسه مدل‌ها با یکدیگر و ارزیابی آن‌ها نیاز به شاخص‌هایی است که بتواند کارکرد مدل‌ها را در کل مجموعه داده‌ها در مقایسه با نتایج تجربی مورد قضاوت قرار دهد. در این پژوهش شاخص ضریب همبستگی که یکی از

جدول ۱: اطلاعات پردازش شده کل شبکه های عصبی تورم آزاد

6	5	4	3	2	1	No
FS07	FS06	FS04	FS03	FS02	FS01	نام شبکه
MLPst	MLPst	MLPst	MLPst	MLPst	MLPst	نوع شبکه
1	1	1	1	1	1	تعداد لایه میانی
5	4	7	6	5	4	نرون هر لایه میانی
Sig.	Sig.	T-Hip.	T-Hip.	T-Hip.	T-Hip.	تابع تحریک لایه میانی
T-Hip.	T-Hip.	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.	تابع تحریک لایه خروجی
8500	8500	9000	9000	9000	8800	تعداد آموزش
65	39	220	165	50	42	مدت زمان آموزش
12	7	30	22	12	6	مدت زمان تست
78	46	250	187	62	48	کل زمان پردازش
70.43	70.21	93.64	93.41	93.24	92.68	همبستگی داده ها
-	-	-	-	-	-	ارزیابی $R^2=95\%$



شکل ۵: بهترین گزینه انتخاب شده برای شبکه تورم آزاد (MLP استاتیکی)



شکل ۶: همبستگی نتایج تورم آزاد و مقادیر آزمایشگاهی در شبکه نهایی تورم آزاد

۱۲-آنالیز حساسیت شبکه عصبی تورم آزاد

۱۲-۱- نمودار حساسیت تورم آزاد به رطوبت طبیعی خاک

شکل ۷، نمودار تغییرات تورم آزاد را به رطوبت طبیعی واقعی نشان می دهد. در این نمودار پارامترهای اندیس خمیری، دانسیته خشک و درصد ریزدانه ثابت نگه داشته شده اند. این نمودار نشان می دهد که در ۴ مقطع مختلف که پارامترهای اندیس خمیری، دانسیته خشک و درصد ریزدانه ثابت نگه داشته شده اند، با کاهش رطوبت طبیعی خاک، مقدار تورم آزاد خاک رسی افزایش خواهد یافت.

طبق پژوهش های بل و همکاران (۱۹۹۵) و همچنین مطالعات وی-جی و همکاران (۱۹۷۳) که طی نموداری رابطه بین درصد رطوبت طبیعی-پتانسیل تورمی-حد روانی را نشان می دهد، با ثابت نگذاشتن حد روانی رابطه عکسی بین رطوبت طبیعی و پتانسیل تورمی دیده خواهد شد [۱۱].

به دلیل آن که نتیجه حاصل شده از آنالیز حساسیت فوق با روابط بل و روابط وی جی یکسان است، می توان نتیجه گرفت که در این مبحث شبکه عصبی فوق با اصول مکانیک خاک هماهنگی دارد.

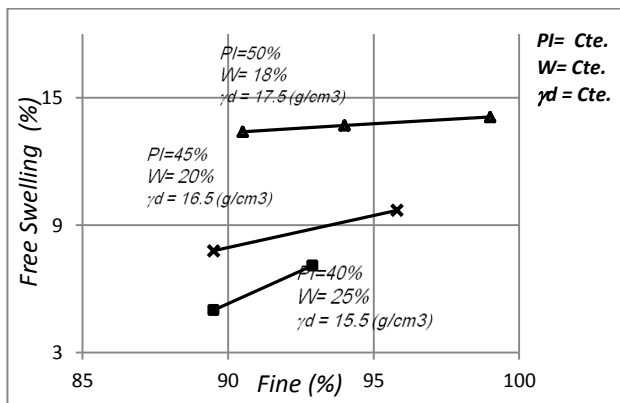
۱۲-۳- نمودار حساسیت تورم آزاد به درصد ریزدانه خاک

شکل ۹، تغییرات تورم آزاد را به درصد ریزدانه خاک نشان می‌دهد. در این نمودار پارامترهای اندیس خمیری، رطوبت طبیعی و دانسیته خشک ثابت نگه‌داشته شده‌اند.

این نمودار نشان می‌دهد که در ۳ مقطع مختلف که پارامترهای اندیس خمیری، رطوبت طبیعی و دانسیته خشک خاک ثابت نگه‌داشته شده‌اند، با افزایش درصد ریزدانه خاک، مقدار تورم آزاد خاک رسی افزایش خواهد یافت.

سید و همکارانش (۱۹۶۲) ادعا کردند که رابطه‌ای یکسان بین درصد رس و پتانسیل تورم برای رس‌های مختلف نمی‌توان ارائه نمود. اما با توجه به بررسی بیش از ۵۰ نوع انواع خاک-های رسی متورم شونده نمودارهایی ارائه داده‌اند که رابطه بین پتانسیل تورمی، اکتیویته و درصد رس را نشان می‌دهد [۱۳].

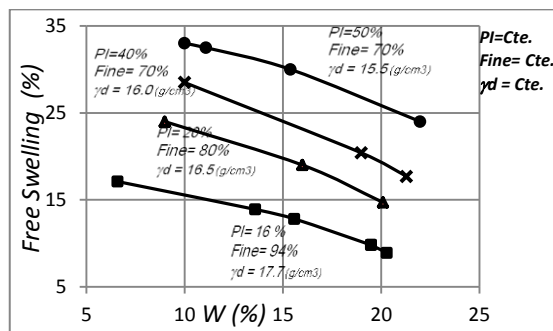
طبق این نمودارها پتانسیل تورم با درصد رس رابطه مستقیم افزایشی دارد. با توجه به ادعای سید و همکاران می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آنالیز حساسیت این بخش نیز صحیح است.



شکل ۹: حساسیت تورم آزاد به درصد ریزدانه خاک

۱۲-۴- نمودار حساسیت تورم آزاد به اندیس خمیری

شکل ۱۰، نمودار تغییرات تورم آزاد را به اندیس خمیری واقعی نشان می‌دهد. در این نمودار پارامترهای دانسیته خشک، رطوبت طبیعی و درصد ریزدانه خاک ثابت نگه‌داشته شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که در ۳ مقطع مختلف که پارامترهای درصد ریزدانه خاک، رطوبت طبیعی و دانسیته خشک خاک ثابت نگه‌داشته شده‌اند، با افزایش اندیس



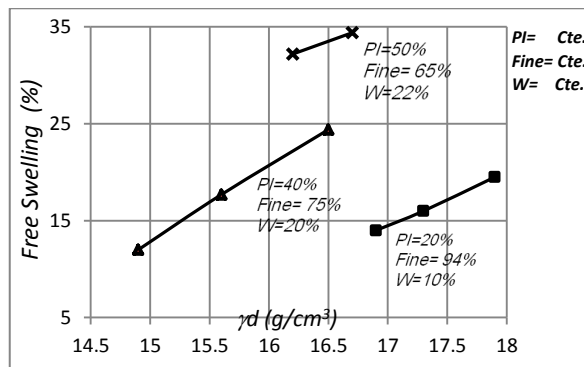
شکل ۷: حساسیت تورم آزاد به رطوبت طبیعی خاک

۱۲-۲- نمودار حساسیت تورم آزاد به دانسیته خشک خاک

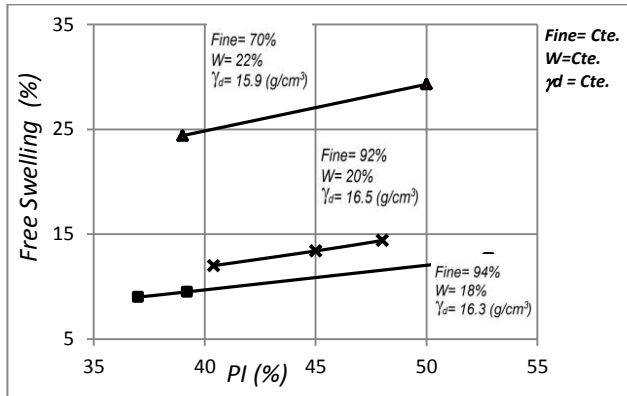
شکل ۸، نمودار تغییرات تورم آزاد را به دانسیته خشک واقعی نشان می‌دهد. در این نمودار پارامترهای اندیس خمیری، رطوبت طبیعی و درصد ریزدانه ثابت نگه‌داشته شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که در ۳ مقطع مختلف که پارامترهای اندیس خمیری، رطوبت طبیعی و درصد ریزدانه ثابت نگه‌داشته شده‌اند، با افزایش دانسیته خشک خاک، مقدار تورم آزاد خاک رسی افزایش خواهد یافت.

طبق روابط نیمه تجربی پتانسیل تورمی - دانسیته خشک حدود اتربرگ، چن (۱۹۸۸) و نلسون (۱۹۹۲) که از آزمایش‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های دست نخورده و به منظور ارزیابی پتانسیل فشارهای تورمی مصالح انجام یافته است، نشان داده شده است که دانسیته خشک با پتانسیل تورم رابطه مستقیم دارند [۱۲].

به دلیل آن که نتیجه آنالیز حساسیت فوق با روابط چن و نلسون یکسان است، می‌توان نتیجه گرفت که نتیجه حاصل شده با روابط مکانیک خاک هماهنگ است.



شکل ۸: حساسیت تورم آزاد به دانسیته خشک خاک



شکل ۱۰: حساسیت تورم آزاد به اندیس خمیری

خمیری خاک، مقدار تورم آزاد خاک رسی افزایش خواهد یافت.

همان‌گونه که پیشتر در بخش ۱۲-۲ اشاره شد، طبق پژوهش‌های بل و همکاران (۱۹۹۵) رابطه‌ای نیز بین درصد رطوبت طبیعی-پتانسیل تورمی-اندیس خمیری به صورت نمودار در آمده است و نشانگر رابطه مستقیم افزایش یافته بین پتانسیل تورم و اندیس خمیری است. این مطلب نیز همسو بودن نتایج آنالیز حساسیت با نتایج تجربی و آزمایشگاهی را بیان می‌کند [۱۱].

جدول ۲: شبکه‌های موفق در اولین ارزیابی شبکه‌های عصبی تورم آزاد

No	نام شبکه	نوع شبکه	تعداد لایه میانی	نرون هر لایه پنهان	تابع تحریک لایه میانی	تابع تحریک لایه خروجی	تعداد آموزش	مدت زمان آموزش (Min)	مدت زمان تست (Min)	کل زمان پردازش (Min)	همبستگی داده‌ها (%)	ارزیابی زمانی
1	FS16	MLPst	1	4	T-Hip.	T-Hip.	10200	38	6	44	96.79	OK
2	FS17	MLPst	1	5	T-Hip.	T-Hip.	10200	65	12	77	96.87	OK
3	FS18	MLPst	1	6	T-Hip.	T-Hip.	10200	205	32	237	96.87	
4	FS19	MLPst	1	7	T-Hip.	T-Hip.	10200	295	38	333	96.89	
5	FS20	MLPst	1	8	T-Hip.	T-Hip.	10200	355	40	395	96.90	
6	FS34	MLPst	2	4	T-Hip.	T-Hip.	12000	140	17	157	96.81	OK
7	FS35	MLPst	2	5	T-Hip.	T-Hip.	12000	290	55	345	96.92	
8	FS36	MLPst	2	6	T-Hip.	T-Hip.	12000	390	70	460	96.94	
9	FS37	MLPst	2	7	T-Hip.	T-Hip.	12000	459	100	559	96.95	
10	FS38	MLPst	2	8	T-Hip.	T-Hip.	12000	545	110	655	96.95	
11	FD1 ₀	MLPd _y	1	4	T-Hip.	T-Hip.	22000	155	20	175	96.80	OK
12	FD1 ₁	MLPd _y	1	5	T-Hip.	T-Hip.	22000	315	45	360	96.89	
13	FD1 ₂	MLPd _y	1	7	T-Hip.	T-Hip.	22500	480	85	565	96.92	
14	FD2 ₅	MLPd _y	2	4	T-Hip.	T-Hip.	19000	470	72	742	96.81	
15	FD2 ₆	MLPd _y	2	5	T-Hip.	T-Hip.	19000	510	90	600	96.94	
16	FD2 ₇	MLPd _y	2	7	T-Hip.	T-Hip.	19000	690	105	795	96.95	

۱۳- جمع بندی و نتیجه گیری

برای این پژوهش به طور کل از سه آرایش شبکه عصبی MLP استاتیکی، MLP دینامیکی و RBF استفاده شده است. در شبکه‌های دینامیکی هدف افزایش آموزش بیشتر، با ایجاد یک حلقه تکرار از خروجی شبکه به ورودی شبکه بوده است. یعنی در هر بار فرآیند تکرار آموزش شبکه از مجموع ورودی‌ها و خروجی شبکه، به عنوان یک ردیف داده جدید در مرحله بعد استفاده شده است. جمع بندی نتایج بیانگر این مطلب است که آرایش‌های MLP استاتیکی و دینامیکی همبستگی‌های بالاتری را نسبت به آرایش RBF از خود نشان می‌دهند. لیکن با توجه به جدول ۲ در مورد شبکه‌های با آرایش MLP استاتیکی و دینامیکی، این اختلاف میان همبستگی به قدری زیاد نیست که آرایش‌های MLP دینامیکی بر استاتیکی ترجیح داده شود، زیرا مدت زمان آموزش و جواب‌گیری نهایی در حالت دینامیکی حدود ۲/۵ تا ۳ برابر مدت زمان حالت استاتیکی می‌باشد. پس به عنوان نتیجه‌گیری اول در این پژوهش، به کلی حالت شبکه‌های MLP استاتیکی برای استفاده بهتر، ترجیح داده می‌شود.

همچنین به عنوان نتیجه‌گیری دوم نیز طبق نتایج جداول ۱ و ۲، با مطالعات انجام شده روی ۶۴ ساختار شبکه عصبی برای شناسایی درصد تورم آزاد در خاک‌های رسی، شبکه‌ای با ساختار MLP استاتیکی با یک لایه پنهان و پنج نرون میانی بعنوان بهترین شبکه در این زمینه معرفی می‌شود. این گزینه قابلیت پیش بینی مقدار تورم آزاد ناشی از خاک‌های رسی با دقت ۹۶/۸۷٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی را در مدت زمان نزدیک به یک ساعت دارد، که نشان دهنده همزمان کاربردی و دقت بالای این آرایش است.

نتیجه گیری سوم این مطلب را دارد که طبق نتایج این پژوهش، تابع تحریک تانژانت هیپروپولیک، به عنوان بهترین تابع تحریک در هر دو لایه میانی و خروجی شبکه‌های عصبی تورم آزاد است.

نتیجه‌گیری چهارم نشان می‌دهد که طبق آنالیز حساسیت انجام شده برای شبکه عصبی تورم آزاد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دانسیته خشک، درصد ریز دانه و اندیس

خمیری فشار تورم نیز افزایش می‌یابد و با افزایش رطوبت طبیعی خاک، فشار تورم کاهش خواهد یافت. صحت این مطلب بنا به منابعی که پیشتر اشاره شد با نتایج آزمایشگاهی و تجربی مقایسه شدند و مشخص شد که با اصول مهندسی مکانیک خاک سازگاری دارند.

۱۴- مراجع

۱. اسدی لنگرودی، آریا، (۱۳۸۶)، "تاثیر بافت خاک روی فشار تورمی خاک‌های رسی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی.
۲. منهای، محمد باقر، (۱۳۸۳)، "هوش محاسباتی"، جلد اول- فصل دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر واحد تفرش.
۳. کمک پناه، حامد، (۱۳۸۷)، " کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی رفتار تورمی خاک‌های رسی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی.

- 4.M.Moosavi,M.J.Yazdanpanah,R.Doostmohammadi, (2006) "Modeling the cyclic swelling pressure of mudrock using artificial neural networks", Engineering Geology 87
- 5.A. Basma, S. Barakat, M. Omar, (2003), "Modeling time Dependent Swell of clays using Sequential Artificial Neural Network",The Geological Society of America, pp. 279-288.
- 6.Y.Mohamedzein, R.Ibrahim, A.Alsanosi , (2006) "Prediction of swelling pressure of Expansive soil using Neural Networks" Expansive Soils, Tylor and Francis, pp. 245-256.
- 7.ASTM International, ASTM D4546 - 08 Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils,
- 8.Mohamed A. Shahin, Holger R. Maier, and Mark B. Jaksa, (2004), "Data Division for Developing Neural Networks Applied to Geotechnical Engineering"
9. Bauer B., Magg s., Wermter S. (2015), "Attention modeled as information in learning multisensory integration" Neural Networks, 65.
- 10.Smith, G.N., Probability and statistics in civil engineering, Collins, 1986
- 11.F.G.Bell,"Geological Hazards, their assessment - avoidance and mitigation", Department of geology and applied geology,University of Natal, Durban, South africa,2002
- 12.Nelson, J.D. and Miller. D.J., 1992, "Expansive Soils: Problems in Practise in Foundation & Pavement Engineering," John Wiley & Sons, Inc.: NewYork, NY.
- 13."Foundations on expansive soils", Headquarters department of the army, Washington, Sep1983