



## برآورد نشست تحکیمی خاکهای رسی با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

جعفر بلوری بزاز<sup>۱</sup>، سعید فرخنده<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی دانشگاه فردوسی مشهد

bolouri@um.ac.ir  
s.f.civilman@gmail.com

### خلاصه

نشست تحکیمی خاکهای رسی که یکی از عوامل مهم در طراحی پروژه های عمرانی می باشد، بر اساس آزمایش تحکیم که یکی از آزمایشهای متداول مکانیک خاک است برآورد می گردد. این آزمایش اصولاً پرهزینه و وقت گیر می باشد. به این دلیل محققین بسیاری تلاش نموده اند تا با استفاده از مشخصات مکانیکی ساده خاک، مقدار شاخص تراکم را که مهمترین متغیر برای تعیین نشست تحکیمی است برآورد نمایند. در همین ارتباط محققین سعی نموده اند روابط ساده ای را ارائه دهند که به دلیل عدم استفاده از همه پارامترهای موثر از دقت بالایی برخوردار نمی باشد. در این مقاله به کمک یکی از انواع شبکه های عصبی و با استفاده از داده های آزمایشگاهی، شامل حدروانی، حد خمیری و نسبت تخلخل میزان شاخص تراکم خاکهای رسی برآورد گردیده است. نتایج حاصله نشان می دهد که مدل ارائه شده از دقت و کارایی قابل قبولی برخوردار می باشد.

کلمات کلیدی: نشست تحکیمی، شاخص تراکم، شبکه عصبی

### ۱. مقدمه

نمونه گیری از خاک با حفظ شرایط واقعی کار مشکلی می باشد. تفاوت قابل توجه در میزان رطوبت، حد روانی و شاخص پلاستیسیته و فشار همه جانبه نمونه های تهیه شده از اعماق مختلف و حتی از یک عمق خاص، بیانگر تفاوت رفتار در نمونه های تهیه شده از یک نوع خاک می باشد و این مسئله علاوه بر افزایش هزینه انجام آزمایشات، سبب پیچیدگی و وارد نمودن قضاوت مهندسی در پروژه های ژئوتکنیک می گردد. داده های آزمایشگاهی زیادی موجود هستند که در پروژه های معینی به کار رفته و عملاً بعد از مدتی به فراموشی سپرده شده اند. این اطلاعات قدیمی می تواند به عنوان یک بانک اطلاعاتی مفید در ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی به کار گرفته شود.

نشست تحکیمی یک از ملاحظات مهم در طراحی پروژه های عمرانی همچون سازه ها، راهها و راه آهن است. این پارامتر از طریق آزمایش تحکیم بدست می آید. با انجام این آزمایش، ضریب فشردگی یا شاخص تراکم  $C_c$ ، به طور مستقیم از شیب نمودار تخلخل  $e$ ، بر حسب لگاریتم تنش موثر برای خاکهای عادی تحکیم یافته و از رابطه (۱) تعیین می گردد.

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0}\right)} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma'_0$  تنش اولیه،  $\Delta\sigma$  افزایش تنش ناشی از سربار،  $e_0$  تخلخل اولیه و  $e_1$  تخلخل ثانویه می باشد.

در نهایت، میزان نشست تحکیمی برای یک رس به طور عادی تحکیم یافته از رابطه (۲) محاسبه می گردد.

$$S_c = \frac{C_c \log((\sigma'_0 + \Delta\sigma) / \sigma'_0)}{1 + e_0} \cdot H \quad (2)$$

که در آن  $\sigma'_0$  تنش اولیه،  $\Delta\sigma$  افزایش تنش ناشی از سربار،  $e_0$  تخلخل اولیه و  $H$  ارتفاع نمونه می باشد.



آزمایش تحکیم یک آزمایش پرهزینه و وقت گیر است که باید با دقت کافی انجام گردد. در بسیاری از پروژه ها به خصوص در پروژه های خطی مانند راهها و راه آهن، عدم انجام آزمایش تحکیم به تعداد و دقت کافی، ساده سازی پارامترهای طراحی و وارد نمودن قضاوت مهندسی ممکن است موجب افزایش هزینه ها گردد. بنابراین لازم است معیارهایی مشخص گردند تا بتوان از طریق آنها، با دانشی جامع و با خطای قابل قبول، نشست تحکیمی خاک را بر مبنای پارامترهای موثر تخمین زد. این کار علاوه بر اینکه سبب کاهش حجم آزمایشات و صرفه جویی در زمان و هزینه می شود، می تواند اطلاعات پیوسته ای از ساختمان مورد نظر را فراهم سازد و دانش طراحان را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد.

شبکه های عصبی مصنوعی، یکی از روش های جدیدی است که در دهه اخیر علاوه بر به کارگیری در علوم مختلف، در حل بسیاری از مسائل ژئوتکنیک گسترش یافته و از آن، در تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی استفاده گردیده است. پیش بینی ظرفیت باربری شمع ها [۱]، پیش بینی میزان نشست فونداسیون های سطحی بر روی خاکهای ماسه ای [۲] و پیش بینی روانگرایی [۳ و ۴]، نمونه هایی از حل مسائل ژئوتکنیکی با استفاده از شبکه های عصبی می باشد. در این مقاله پس از بررسی روابط تجربی ارائه شده توسط سایر محققین جهت تخمین نشست تحکیمی، با استفاده از داده های آزمایشگاهی و یکی از انواع شبکه های عصبی مصنوعی، مدلی جهت تخمین میزان شاخص تراکم خاک ساخته شده است.

## ۲. روابط تجربی ارائه شده در نشست تحکیمی خاکهای رسی

تخمین نشست تحکیمی بر مبنای پارامترهای موثری که با انجام آزمایشات ساده، کم هزینه و با دقت مناسب قابل تعیین باشد، همواره مورد توجه محققین ژئوتکنیک بوده است. اولین بار ترازقی و پیک [۵] در سال ۱۹۹۷ روابط تجربی زیر را به منظور تخمین شاخص تراکم، برای رس های عادی تحکیم یافته به طور غیر مستقیم و بر اساس پارامترهای ساده به ترتیب در حالت دست نخورده و دست خورده پیشنهاد نمودند.

$$C_c = 0.009(LL-10) \quad (3)$$

$$C_c = 0.007(LL-10) \quad (4)$$

در این روابط LL حد روانی و  $C_c$  شاخص تراکم خاک می باشد.

همچنین Azzouz و همکاران با استفاده از رگرسیون تک متغیره خطی، برای مناطق مختلف روابط زیر را ارائه نمودند [۶].

$$C_c = 0.0046(LL-9) \quad \text{رس برزیل} \quad (5)$$

$$C_c = 0.208 e_0 + 0.0083 \quad \text{رس شیکاگو} \quad (6)$$

$$C_c = 0.0115 w_n \quad \text{خاکهای آلی و نباتی} \quad (7)$$

در این روابط LL حد روانی،  $e_0$  نسبت تخلخل اولیه و  $w_n$  رطوبت طبیعی خاک به عنوان پارامترهای موثر در نظر گرفته شده است. در تحقیقی دیگر Nacci و همکاران [۷]، با انجام مطالعه در خاکهای آتلانتیک شمالی رابطه زیر را پیشنهاد نمودند:

$$C_c = 0.02 + 0.014PI \quad (8)$$

در این رابطه PI و  $C_c$  به ترتیب نشانه خمیری خاک و شاخص تراکم می باشد.

همچنین بر اساس درصد تخلخل اولیه، چندین رابطه تجربی دیگر، توسط محققین مختلف ارائه شده که در فرمول های زیر مشاهده می گردد [۸ و ۹].

$$C_c = 1.15(e_0 - 0.35) \quad \text{همه رس ها} \quad (9)$$

$$C_c = 0.3(e_0 - 0.27) \quad \text{خاک چسبیده غیر آلی و لای} \quad (10)$$

$$C_c = 0.75(e_0 - 0.5) \quad \text{خاکهای با پلاستیکیت پایین} \quad (11)$$

$$C_c = (1.15e_0 - 0.0107)(1 + e_0) \quad \text{همه رس ها} \quad (12)$$

همانگونه که مشاهده می شود، در تمامی این روابط اثر پارامترها، به طور مجزا دیده شده و ترکیب آنها در یک رابطه برای تعیین شاخص تراکم منظور نشده و بنابراین، نتیجه از دقت و خطای قابل قبولی برخوردار نمی باشد.



### ۳. مجموعه داده ها

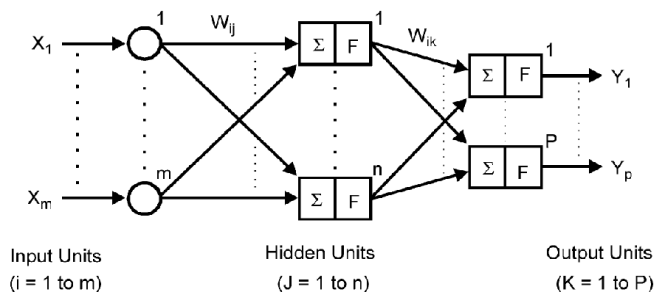
وجود یک بانک اطلاعاتی مناسب، اولین قدم در استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی می باشد. هر مجموعه داده باید دارای سه مشخصه زیر باشد:

- ۱- واقعی بوده و دارای دقت کافی باشد.
  - ۲- دارای اطلاعات کافی در رابطه با ابعاد و پیچیدگی مسئله باشد.
  - ۳- همه جنبه های مسئله مورد بررسی را پوشش دهد.
- در این تحقیق، پایگاه اطلاعاتی شامل ۱۹۰ مجموعه داده آزمایشگاهی در شهر مشهد است که از چند آزمایشگاه مکانیک خاک تهیه گردیده است [۱۰]. با توجه به روابط تجربی ارائه شده توسط سایر محققین، پارامترهای نسبت تخلخل اولیه (e)، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)، به عنوان مهم ترین پارامترهای تاثیر گذار در تعیین شاخص تراکم ( $C_c$ ) در این تحقیق، استفاده شده است.

### ۴. مدل های شبکه عصبی

در طی دهه اخیر شاهد حضور موفق شبکه های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks) در علوم مختلف بوده ایم. در مسائل پیچیده که رابطه بین متغیرها شناخته شده نیست، این شبکه ها یک ابزار قدرتمند پیش بینی می باشند. شبکه های عصبی مصنوعی، به عنوان یکی دیگر از مؤلفه های مهم و اساسی هوش محاسباتی، از محاسبات نورونی در مغز انسان، به عنوان یک سیستم پردازش اطلاعات با ساختار موازی و کاملاً پیچیده الهام گرفته شده اند. رشد و توسعه شبکه های عصبی، چه در بعد آنالیز و توسعه ساختاری و چه در بعد پیاده سازی سخت افزاری و از نظر کمی، کیفی و توانایی، موجب کاربرد این ابزار در حوزه های مختلف کاربردی از جمله طبقه بندی (Classification)، شناسایی و تشخیص الگو (Pattern-Recognition)، پردازش سیگنال (Signal Processing)، بهینه سازی، مدل سازی و کنترل شده است.

در یک شمای کلی از شبکه عصبی، واحد شبیه سازی (نرون)، به عنوان یک عنصر پردازنده تعریف می شود. شبکه شامل تعداد زیادی از این واحدها است که در تعدادی لایه که به طور کامل یا جزئی به هم مرتبط هستند، قرار می گیرد. شکل (۱) معماری ساده از یک شبکه دو لایه ای را نشان می دهد.



$$I_j (NET_j) = \sum W_{ij} X_i + T_j$$

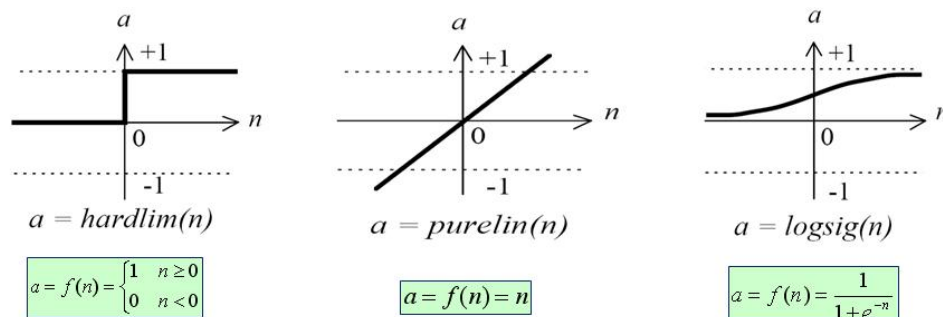
$$Y_j (OUT_j) = F(I_j)$$

شکل ۱ - نمونه ای از شبکه عصبی دو لایه ای

با توجه به آرایش اتصال عصبها انواع مختلفی از این شبکه ها ارائه شده است. به عنوان مثال شبکه های پیش رونده (Feed Forward) و برگشتی (Recurrent) که هر یک می توانند صورت تک لایه ای یا چند لایه ای داشته باشند. یکی از متداول ترین انواع شبکه های پیش رونده، شبکه های Multi-Layer Perceptron (MLP) می باشند که در این تحقیق نیز از آنها استفاده شده است. این شبکه ها از نوع شبکه های چند لایه ای می باشند. در لایه اول (لایه ورودی) اطلاعات ورودی سیستم به شبکه تغذیه می شوند. لایه خروجی که خروجی های شبکه در آن محاسبه می شود. لایه های بین لایه ورودی و لایه خروجی لایه های مخفی نامیده می شوند که پردازش داده ها در آنها صورت می گیرد. علت اینکه به این شبکه ها، پیش رونده گفته می شود این است که خروجی هر لایه به عنوان ورودی لایه بعد در نظر گرفته می شود.



توابع انتقالی (Transfer functions) که در شبکه های عصبی مورد استفاده قرار می گیرند اشکال بسیار متنوعی دارند. از جمله توابع انتقال متداول در ساختار شبکه های عصبی مصنوعی می توان به توابع *hardlim*، *Purelin*، *Logsigmoid* و اشاره نمود [۱۱]. شکل (۲) توابع مورد نظر را نشان می دهد.



شکل ۲ - نمونه هایی از توابع انتقال پر کاربرد مورد استفاده در شبکه های عصبی

در این تحقیق از تابع انتقال *Logsigmoid*، در شبکه عصبی مورد نظر استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که نرم افزار MATLAB قابلیت مدل سازی شبکه عصبی را داراست و در اینجا نیز مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه رو به جلو با الگوریتم پس انتشار خطا، به طور موفقیت آمیز برای بسیاری از مسائل مهندسی ژنوتکنیک به کار گرفته شده است [۱] و در این تحقیق نیز استفاده می گردد. همچنین روش *Levenberg-Marguardt* یک تکنیک پیشرفته غیر خطی است که به جای تکنیک گرادین نزولی، برای بهبود سرعت و عملکرد عمومی پس انتشار خطا استفاده می شود. [۱۲] فرمول الگوریتم پس انتشار خطا با روش ذکر شده به صورت زیر تعریف می شود.

$$\Delta W = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (13)$$

که در آن،  $J$  ماتریس ژاکوبین خطای مربوط به وزن ها،  $\mu$  ضریبی است که بین ۰ و ۱ قرار داشته و  $I$  ماتریس یکه و  $e$  بردار خطا می باشد.

### ۵. تقسیم بندی داده ها

همان طور که قبلاً اشاره شد بانک اطلاعاتی شامل ۱۹۰ دسته داده است که هر دسته شامل نسبت تخلخل ( $e$ )، حد روانی ( $LL$ )، حد خمیری ( $PL$ ) و شاخص تراکم ( $C_c$ ) می باشد. معمولاً در یک شبکه عصبی، داده ها به ۳ گروه تقسیم بندی می شود:

۱- داده های آموزش (*Training*)، به منظور ساخت مدل شبکه

۲- داده های ارزیابی (*Validation*)، به منظور جلوگیری از متخصص شدن شبکه و تعمیم پذیری در مرحله آموزش

۳- داده های تست (*Test*)، به منظور ارزیابی عملکرد شبکه بعد از آموزش

بررسی ها نشان می دهد که روش تقسیم بندی داده ها اثر زیادی بر روی نتایج خروجی دارد. در این تحقیق، ۱۳۰ مجموعه داده به عنوان داده های آموزش، ۳۰ مجموعه داده به عنوان داده های ارزیابی و ۳۰ مجموعه داده نیز به عنوان داده های تست استفاده می شود. باید توجه داشت که شبکه عصبی یک سیستم درونیاب است و بنابراین داده های آموزش باید شامل مقادیر حداقل و حداکثر داده های ورودی و خروجی باشد. همچنین به منظور تعمیم پذیری شبکه، هر ۳ زیر مجموعه داده ها باید تا حد امکان دارای خواص آماری یکسانی باشند. در این تحقیق به منظور رسیدن به این هدف، چندین ترکیب تصادفی از داده ها در هر ۳ مجموعه داده استفاده گردید که خواص آماری آنها شامل میانگین، انحراف از معیار، مینیمم، ماکزیمم و محدوده داده ها در جدول (۱) ارائه گردیده است.



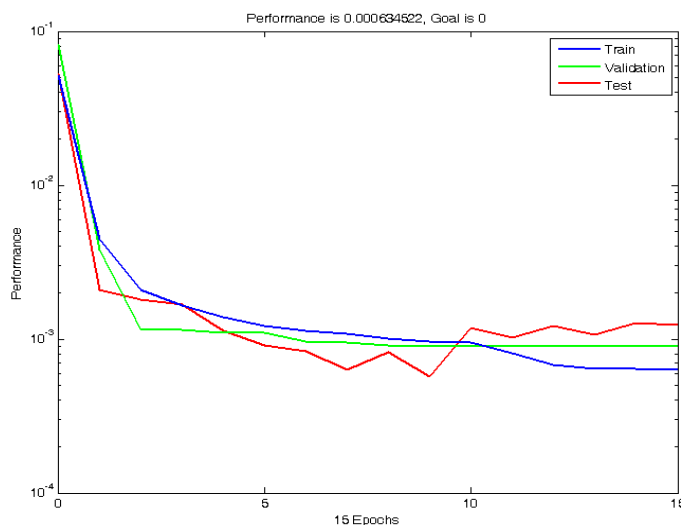
جدول ۱- مقادیر آماری ورودی و خروجی در شبکه عصبی

حد اکثر	حداقل	انحراف از معیار	میانگین	مرحله	متغیرهای ورودی و خروجی
0.974	0.514	0.114	0.72	آموزش	تخلخل (e)
				تست	
63	19.4	11.16	34.67	آموزش	حد روانی (LL)
				تست	
35	11	5.36	21.11	آموزش	حد خمیری (PL)
				تست	
0.33	0.038	0.066	0.16	آموزش	شاخص تراکم (Cc)
				تست	

### ۶. آموزش شبکه

دو فاز اصلی در شبکه عصبی مصنوعی وجود دارد: آموزش و بازخوانی. پس از تعیین آرایش شبکه، می توان آموزش شبکه را آغاز نمود. آموزش شبکه های عصبی به عنوان یک مساله بهینه سازی غیر خطی شناخته شده است که هدف آن تعیین پارامترهای شبکه یعنی ماتریس های وزن و بردارهای هر لایه می باشد. پارامترهای شبکه طوری تعیین می شود که اندیس عملکرد شبکه که معمولاً میانگین مربعات خطای پیش بینی حاصل از داده های آموزشی می باشد، کمینه گردد.

یکی از نکاتی که حین آموزش باید در نظر گرفته شود جلوگیری از **Overfitting** یا قرار گرفتن در مینیمم های موضعی در رسیدن به خطای حداقل می باشد. در این حالت خطای شبکه فقط در نقاط آموزشی کم بوده و در نقاط میانی خطا زیاد میشود. برای رفع چنین نقیصه ای معمولاً در حین آموزش شبکه یک سری از داده ها جهت صحت گذاری (Validation) در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب که در بازه های منظم از روند بهینه سازی، داده های حاصل از شبکه با استفاده از داده های صحت گذاری مورد بررسی قرار می گیرند. آموزش شبکه تا زمانی ادامه می یابد که خطای بهینه سازی مربوط به داده های صحت گذاری شروع به افزایش کند و به محض اینکه این خطا افزایش یابد آموزش شبکه متوقف می شود [۱۲]. شکل (۳) نمونه ای از مرحله آموزش شبکه را توسط نرم افزار MATLAB نشان می دهد.

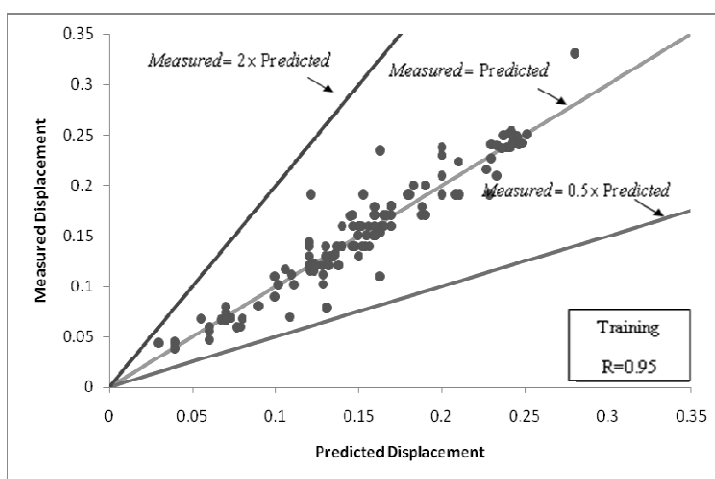


شکل ۳- نمونه ای از مرحله آموزش شبکه توسط نرم افزار MATLAB

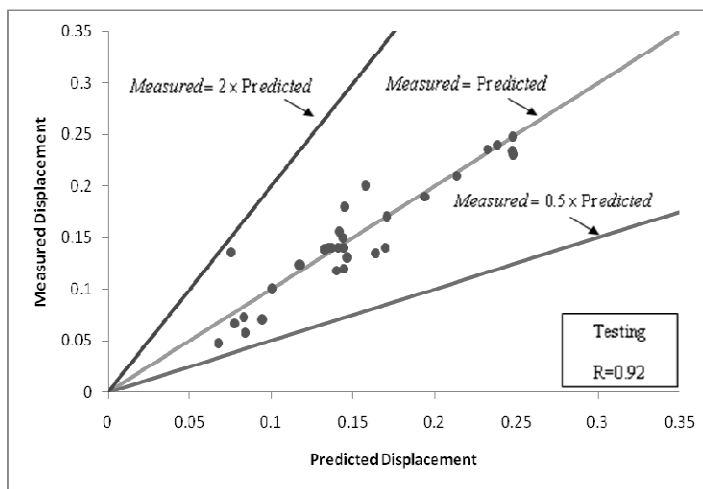


## ۷. آزمایش مدل

زمانی که آموزش مدل به طور موفقیت آمیز پایان یافت، عملکرد آن با استفاده از داده های تست که در آموزش شبکه به کار نرفته اند بررسی می شود. در این تحقیق، ضریب همبستگی (R) و ریشه مجذور میانگین خطا (RMSE)، برای ارزیابی مدل شبکه عصبی به کار می رود. براساس محاسبات انجام گرفته در این تحقیق، مشخص شد که شبکه عصبی تک لایه با ۶ نرون در لایه مخفی، کمترین خطا و بیشترین ضریب همبستگی را نتیجه می دهد. شکل های (۴) و (۵)، قابلیت پیش بینی شبکه عصبی مصنوعی را در نمودار شاخص تراکم پیش بینی شده توسط شبکه عصبی، در مقابل شاخص تراکم اندازه گیری شده توسط آزمایش، به ترتیب برای داده های آموزشی و تست نشان می دهد.



شکل ۴ - نمودار شاخص تراکم اندازه گیری شده در مقابل شاخص تراکم پیش بینی شده برای داده های آموزشی (Train)



شکل ۵ - نمودار شاخص تراکم اندازه گیری شده در مقابل شاخص تراکم پیش بینی شده برای داده های تست (Test)

همانطور که دیده می شود اکثر شاخص های تراکم پیش بینی شده، در نزدیکی خط میانگین قرار دارد و این امر نشان دهنده این است که شبکه با  $RMSE=0.021$  و  $R=0.92$  برای محدوده شاخص تراکم از  $0.038$  تا  $0.33$  از کارایی و دقت مناسبی برخوردار می باشد.



## ۸. نتیجه گیری

تخمین نشست تحکیمی، با استفاده از پارامترهای موثری که بتوان آنها را با انجام آزمایشات ساده و با دقت قابل قبول تعیین نمود، در بسیاری از پروژه های عمرانی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. علی رغم کارهای بسیاری از محققین که تلاش نموده اند تا با استفاده از فرمول های تجربی، و بدون انجام آزمایش تحکیم، شاخص تراکم خاک را پیش بینی نمایند، ولی اکثر این روابط منحصر به یک پارامتر بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار نمی باشد. بنابراین لازم است معیارهایی مشخص گردند تا بتوان از طریق آنها، با دانشی جامع و با خطای قابل قبول، نشست تحکیمی خاک را بر مبنای همه پارامترهای موثر تخمین زد. یکی از این روش ها که در دهه اخیر بسیار پرکاربرد شده است، شبکه های عصبی مصنوعی می باشد. در این تحقیق از یک شبکه عصبی دو لایه ای رو به جلو به منظور تخمین نشست تحکیمی خاکهای رسی استفاده گردیده است. بر این اساس نتایج زیر حاصل گردیده است:

- ۱- پارامترهای حدروانی، حد خمیری و تخلخل اولیه، از مهم ترین پارامترهای موثر در تعیین ضریب فشردگی خاکهای رسی می باشد که در تحقیقات قبلی نیز مورد توجه محققین مختلف بوده است.
- ۲- در نظر گرفتن اثر همزمان پارامترهای مذکور، خطای کمتری را نسبت به روابط تجربی سایر محققین نشان می دهد.
- ۳- پارامتر نسبت تخلخل اولیه، به عنوان مهم ترین و اصلی ترین پارامتر در تعیین ضریب فشردگی خاک است و با ضریب تحکیم خاک، ارتباط مستقیم داشته و حذف آن در مدل ساخته شده سبب کاهش چشم گیر ضریب همبستگی می شود.
- ۴- مدل شبکه عصبی ارائه شده با  $RMSE = 0.021$  و  $R = 0.92$  برای محدوده شاخص تراکم از  $0.38$  تا  $0.43$  از کارایی و دقت مناسبی برخوردار می باشد.

## ۹. قدردانی

از شرکت های مهندسی مشاور جهد آزما، آب پوی و مهار آب که در ارائه داده های این تحقیق، نویسندگان مقاله را یاری نمودند، تشکر و قدردانی می گردد.

## ۱۰. مراجع

1. Goh A. T. C., (1966), "Pile driving records re-analyzed using neural networks" Journal of Geotech. Eng. 122(6):492-5.
2. Goh, A. T. C., (1994), "Seismic liquefaction potential assessed by neural networks", Journal of Geotech. Eng; 120(9), pp. 1467-80.
3. Baziar M. H. and Nilipour N. (2003), "Evaluation of liquefaction potential using neural-networks and CPT results", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Eng.; 23, pp. 631-6.
4. Baziar MH, Nilipour N. Evaluation of liquefaction potential using neural-networks and CPT results. J Soil Dyn Earthquake Eng 2003; 23:631-6
5. Terzaghi, K., and Peck, R. B., 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., Wiley, New York
6. Azzouz, A. S., Krizek, R. J. and Corotis, R. B., 1976, Regression Analysis of Soil Compressibility, Soil Found., Tokyo. vol. 16, no 2, pp. 19-29
7. Nacci, V. A., Wang M. C. and Demras, K. R. Engineering Behavior of Calcareous Soils, Proc. Civil Eng. Oceans III, ASCE, vol. 1, pp. 380-400, 1975
8. Bowles, J. E., 1979, Physical Geotechnical Properties of Soils, International Student Edition, McGraw-Hill, Inc. 478 PP
9. Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc. New York, 510pp
۱۰. گزارش مطالعات ژئوتکنیک و زمین شناسی پروژه های عمرانی شهر مشهد، مهندسین مشاور جهد آزما، آب پوی، مهار آب
11. Hagan, M. T., H. B. Demuth and M. Beale, Neural Network Design, PWS Publishing Company, 1996
12. Demuth H, Beale M. Neural network toolbox for user with MATLAB. the MATH WORKS Inc; 1996.