

به کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین چسبندگی زهکشی نشده خاک رس (C_u) با استفاده از عدد SPT، فشار سربار، درصد رطوبت و حدود اتربرگ

مهیار عربانی و مهدی ویس کرمی

چکیده: بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی در بسیاری از علوم مهندسی عملیات روی داده‌ها را ساده‌تر می‌نماید. شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌هایی هستند که بر اساس ارگانیسم مغز انسان ساخته شده‌اند. کاربرد این شبکه‌ها برای انجام وظایفی مانند تعیین الگوی تشخیص، توابع تقریبی، بهینه‌سازی، پیش‌بینی‌های آتی، کنترل اتوماتیک و اطلاعات بازیافتی بسیار موفقیت‌آمیز بوده است. پارامتر چسبندگی زهکشی نشده خاک (C_u) در طراحی‌های ژئوتکنیکی مانند طراحی سازه‌های خاکی به هنگام زلزله نقش مهمی را ایفا می‌کند. در تعیین این پارامتر، علاوه بر روشهای آزمایشگاهی، بهره‌گیری از آزمایش‌های درجا مانند CPT و SPT نتایج قابل اعتمادی را بدست می‌دهند. بسیاری از محققین در چند دهه اخیر، برای بیان وابستگی نتایج آزمایش‌های درجا با پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، روابط، نمودارها و روش‌هایی را ارائه نموده‌اند. در مقاله اخیر، ارتباط بین فشار سربار (σ_0)، عدد SPT (N_{SPT})، دامنه خمیری (PI)، حد روانی (LL) و درصد رطوبت (w) با پارامتر چسبندگی زهکشی نشده خاک رس (C_u) بررسی شده است. برای این منظور با استفاده از الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی و بر پایه داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری UU و تک محوری انجام شده در مطالعات ژئوتکنیک چندین محل در نقاط مختلف ایران، ارتباط بین این پارامترها مدلسازی گردیده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی همبستگی بسیار مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: درصد رطوبت، چسبندگی زهکشی نشده، حد خمیری، حد روانی، شبکه عصبی مصنوعی، عدد SPT، فشار سربار.

۱. مقدمه

۱-۱. شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، به طور وسیع در شناخت مکانیزم ساختاری مواد [۱]، به طور برجسته‌ای در بهینه‌سازی سازه‌ها [۲] و در شناخت و ردیابی آسیب‌ها و در تولید شبکه المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرند. اصطلاح شبکه عصبی مصنوعی دربرگیرنده دامنه وسیعی از ابزارهای محاسباتی است که از فرآیندهای بیولوژیکی الگو گرفته‌اند. امروزه، علوم مهندسی در حال

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۸/۱۰ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۴/۹/۱ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر مهیار عربانی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، مجتمع دانشگاهی دانشگاه گیلان. m_arbani@yahoo.com

مهدی ویس کرمی، دانشکده فنی، دانشگاه شیراز، مجتمع دانشگاهی دانشگاه شیراز. mvk_1980@yahoo.com

گذار به سوی استفاده از بانکهای اطلاعاتی و روشهای جدید تجربی - تئوریک به جای استفاده از روشهای عددی در حل مسائل پیچیده است. چرا که این مسائل از جهت تحلیلی گاه آنچنان پیچیده هستند، که حل بسته‌ای^۲ برای آنها وجود ندارد و یا بسیاری پارامترهای ظاهراً بی‌ارتباط در تحلیل آنها نقش دارند. این روشهای جدید، عموماً بر پایه استفاده از الگوهایی مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی قرار گرفته‌اند. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی یا بهره‌گیری از منطق فازی به جای روشهای المان محدود بزودی آینده علوم مهندسی در دنیا را رقم خواهد زد. تعداد پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین رفتار مواد هنوز چندان زیاد نیست. یکی از آخرین فعالیت‌های انجام شده در این زمینه پژوهشی است که توسط Ghaboussi و همکاران انجام شده است [۳]. رفتار بتن تحت

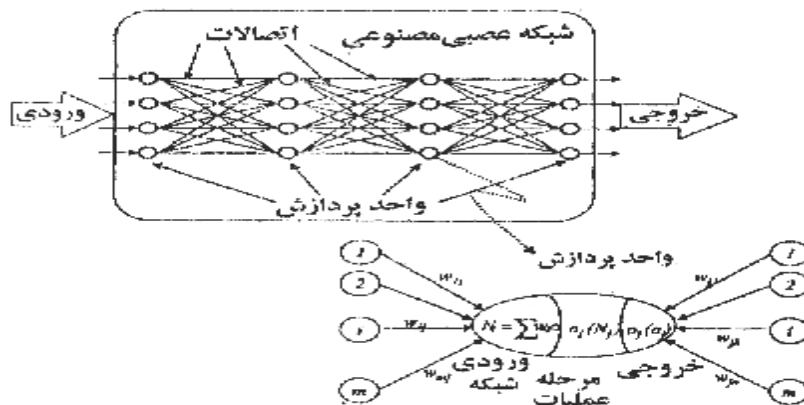
² Close Solution

الگوی ارتباطی واحدهای پردازش باعث می‌گردد که اطلاعات شبکه به صورت کدهایی ذخیره گردد [۷].

۱-۲. چسبندگی زهکشی نشده خاک ها (C_u)

پارامتر چسبندگی خاک (C) که اساس مقاومت و تسلیم خاک می‌باشد، در آزمایشگاه به روش‌هایی چون آزمایش تک محوری و آزمایش سه‌محوری در سه حالت UU (مشابه با آزمایش تک‌محوری)، C_u و CD تعیین می‌شود. هر یک از این آزمایشها بر اساس شرایط درجای خاک، نمونه را مدل نموده و بر اساس آن سه نوع مختلف از پارامتر چسبندگی خاک را که عبارتند از C_u ، C و C_{cu} به دست می‌دهند. پارامتر C_u بوسیله آزمایشهای UU و تک‌محوری تعیین شده و چسبندگی خاک را در شرایط بارگذاری سریع و در بدترین شرایط ممکن، یعنی حالت تحکیم نیافته نشان می‌دهد. این پارامتر و زاویه اصطکاک داخلی، از ترسیم پوش گسیختگی مرسوم به پوش Mohr-Coulomb به دست می‌آیند. این پوش تسلیم در واقع یک خط مستقیم نبوده و این امر نشان می‌دهد که دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، به عامل فشار همه‌جانبه خاک وابسته‌اند. گرچه جهت سهولت در محاسبات و جلوگیری از پیچیدگی معادله سطح تسلیم، این پوش به صورت خطی فرض می‌شود. با ملاحظه این پوش در حالت واقعی یعنی حالت غیرخطی، به نظر می‌رسد که با افزایش فشار همه‌جانبه، پارامتر چسبندگی خاک افزایش یافته و اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد که دلیل این امر فشارهای بالای همه‌جانبه است. همچنین پوش گسیختگی عموماً به صورت دو بعدی و مستقل از تنش میانی (σ_2) فرض می‌شود و گسیختگی تنها در فضای تنشهای $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ و $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ یعنی فضای تنش نرمال و تنش برشی خاک بررسی می‌گردد [۹ و ۸].

سیکل‌های بارگذاری تک محوری و دو محوری یکنواخت با آموزش شبکه عصبی مصنوعی و بر پایه تعداد نسبتاً زیادی از نمونه‌های واقعاً یکسان مدلسازی شد. رابطه تنش- کرنش ماسه‌ها و رفتار برشی خاکهای رسوبی در شرایط تنش- کرنش سه محوری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدل گردید [۵ و ۴]. از دیدگاه فیزیکی، شبکه عصبی مصنوعی، مجموعه‌ای از اجزای محاسباتی ساده ریاضی را به یکدیگر مرتبط می‌سازد. این اجزای محاسباتی دارای حافظه محلی بسیار محدودی بوده و عملیات اصلی ریاضی را بر روی داده‌های ورودی انجام می‌دهند. قدرت محاسباتی شبکه‌های عصبی مصنوعی به علت ترکیب موازی بین بخش‌های مختلف آنها است. یعنی اطلاعات ورودی می‌توانند، به طور همزمان توسط چندین جز محاسباتی مورد پردازش قرار گیرند. طرح ساختمانی شبکه‌های عصبی مصنوعی در شکل یک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این شبکه از تعداد زیادی واحد پردازش عصبی تشکیل شده است که در ارتباط با هم فعالیت می‌کنند. این عصب‌های مصنوعی تنها جزئی از اطلاعات را نگهداری کرده و فقط بخشی از عملیات را بر عهده دارند. آنها قابلیت انجام محاسبات ساده را نیز داشته و هر یک اطلاعات را از بخش ماقبل خود دریافت کرده و عملیات مربوط به خود را بر روی آن انجام می‌دهد (a_i). هر واحد پردازش با واحدهای قبل و بعد خود در ارتباط بوده و به طور مداوم اطلاعات را از واحد مجاور خود (قبل یا بعد) دریافت کرده و آن را پردازش می‌نماید. لازم به ذکر است که هر داده با وزنی خاص در پردازش شرکت می‌نماید و هر اتصال بین دو واحد با وزن خود (W_{ij}) بیان می‌شود و شبکه بر اساس این وزن اطلاعات را پردازش کرده و رابطه‌ای را بین سایر اطلاعات ایجاد می‌نماید (N_i). سپس خروجی را محاسبه کرده (O_i) و آن را به قسمت بعدی منتقل می‌کنند. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده از شبکه عصبی مصنوعی به مقادیر وزنه‌های W_{ij} وابسته است که این وزن‌ها طی مرحله آموزش شبکه تعیین می‌گردد [۶].



شکل ۱. نمونه‌ای از طرح ساختاری شبکه‌های عصبی مصنوعی

بسیار متأثر از تغییرات رطوبت است و درصد رطوبت طبیعی خاک بر خصوصیات مکانیکی این نوع از خاک‌ها تأثیر می‌گذارد. بر اساس

درصد رطوبت هم پارامتری است که بر بسیاری از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مؤثر می‌باشد. به خصوص در ریزدانه‌ها، رفتار خاک

SPT را نشان می‌دهد. در این مورد می‌توان به نمودار Robertson et al. (1983) که ارتباط بین N_{55} و q_c با D_{50} نمونه‌های خاک را به دست می‌دهد، اشاره نمود [۱۴].

از نتایج آزمایش SPT در تعیین ظرفیت باربری خاک در شالوده‌های سطحی (after Peck et al., 1974)، تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی دیگر خاک مانند ϕ و C_u ، تراکم نسبی و وزن مخصوص خاک و همچنین شناسایی کیفی لایه‌های خاک یا به نوعی طبقه‌بندی خاک استفاده می‌شود (CFEM, 1992).

علاوه بر این Wroth (1984) با ارائه جدولی میزان کاربرد آزمایشهای درجا و در میان آنها SPT را در تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاکها نشان داده است. این آزمایش در تعیین احتمال روانگرایی و نسبت پیش تحکیمی خاک (OCR) کاربرد زیادی دارد [۱۶ و ۱۵]. پارامترهای مختلفی بر نتایج SPT تاثیرگذارند و نتایج این آزمایش عموماً بر مبنای این پارامترها تصحیح می‌شود.

به عنوان مثال، انرژی کوبشی پارامتری است که همواره عدد SPT بر مبنای آن تصحیح می‌شود و رابطه‌ای در CFEM برای تصحیح انرژی کوبشی وجود دارد که در معادله ۱ نشان داده شده است [۱۶].

$$N_{60} = N \left(\frac{ER_f}{60} \right) \quad (1)$$

در این رابطه ER_f انرژی کوبش اندازه‌گیری شده است. عدد SPT را باید برای این انرژی، یعنی ۶۰٪ انرژی کل تصحیح نمود. همچنین عدد SPT به پارامتر فشار سربار (σ_0) نیز بستگی دارد. این پارامتر نیز با معادله دیگری بر نتایج SPT تاثیر گذار است [۱۶].

در این پژوهش تأثیر فشار سربار به طور مستقیم مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین تأثیر فشار سربار نه توسط یک رابطه ریاضی که به صورت یک پارامتر مجزا، در تعیین C_u در نظر گرفته می‌شود. این امر بدلیل آن است که پارامترهای مقاومت برشی خاک خود به فشار همه‌جانبه آن بستگی دارند.

۲. مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱. ارتباط بین نتایج SPT و چسبندگی زهکشی نشده رسها

بررسی‌های انجام شده با استفاده از نتایج آزمایشهای ژئوتکنیک در محل نیروگاه کیش، محل ینگی کند، محل نیروگاه خوی، محل نیروگاههای مشهد و ماهشهر و چندین محل دیگر استوار است، که این آزمایشها عبارتند از آزمایشهای درجا و آزمونهای آزمایشگاهی که بر روی نمونه‌های به دست آمده از گمانه‌های موجود در این محلها انجام شده اند.

در بررسی‌های مربوط به این محلها، بیش از ۲۰۰ گمانه در میان بالغ بر ۲۵۰ تا ۳۰۰ گمانه حفر شده، جهت انجام مطالعات، مورد استفاده قرار گرفتند. بر روی نمونه‌های خاک اخذ شده از کلیه این گمانه‌ها، آزمایشهای تک محوری یا سه محوری UU، تعیین درصد

اینکه خاک در رطوبت طبیعی خود به کدام یک از حدود اتربرگ نزدیک باشد، رفتارهای متفاوتی از آن انتظار می‌رود [۹ و ۱۰].

علاوه بر آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایشهای درجای ژئوتکنیکی نیز به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم در تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، سختی خاک و پارامترهای ژئوفیزیکی آن و تعدادی دیگر از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک نقش دارند.

۳-۱. کاربرد آزمایش SPT در مهندسی ژئوتکنیک

آزمایشهای درجا (In situ tests) در مهندسی ژئوتکنیک، در دو دهه اخیر جایگاهی ویژه را به خود اختصاص داده است.

به دلیل وجود مشکلاتی چون تهیه نمونه‌های دست نخورده از خاک، مدل نمودن فشار همه‌جانبه خاک در آزمایشگاه مطابق با شرایط طبیعی، وابستگی رفتار خاک به شرایط فشار همه‌جانبه، حمل و بازسازی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه و مانند آن، استفاده از آزمایشهای درجا در مطالعات ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است.

همبستگی بین نتایج آزمونهای آزمایشگاهی و آزمایشهای درجا و همچنین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک چون چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پیش تحکیمی (OCR)، تراکم نسبی (D_r) و پارامترهای دیگر، بوسیله روابط و نمودارهایی توسط محققین مختلف بیان شده است. از نتایج آزمایشهای درجا در طراحی‌ها، به طور مستقیم و یا غیر مستقیم استفاده می‌شود. در این میان دو آزمایش CPT و SPT از جایگاهی ویژه در مهندسی ژئوتکنیک برخوردارند.

آزمایش CPT، با ارائه پروفیلی پیوسته از خاک و همچنین دقت بالا در تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی آن با توجه به شرایط درجای خاک، نتایجی بسیار مفید و قابل اعتماد را به دست می‌دهد، که از نتایج آن در تعیین باربری شمع‌ها به طور مستقیم و غیر مستقیم (Meyerhof, 1976, Schmermann and Nottingham, 1978) تعیین پروفیل خاک (Robertson and Campanella, 1986) و (Eslami and Fellenius, 1996) و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک استفاده می‌شود [۱۱ و ۱۲ و ۱۳]. در مورد اخیر می‌توان به نمودار Robertson-Campanella (1983) اشاره نمود که در آن بر اساس فشار سربار و مقاومت نوک مخروط در آزمایش CPT، مقداری برای زاویه اصطکاک داخلی ماسه‌های کوارتزی به دست می‌آید [۱۴].

آزمایش CPT عموماً بر هزینه است و آزمایش SPT به دلیل هزینه‌های بسیار پایین‌تر نسبت به آزمایش CPT و همچنین تجهیزات ساده‌تر و کارایی بهتر در انواع مختلف خاک‌ها، (بر خلاف CPT که عموماً در خاک‌های ریزدانه کاربرد دارد)، بسیار مورد توجه است. نتایج تحقیقات اخیر، همبستگی خوبی را بین نتایج CPT و

در تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک، راه‌حلی مناسب به نظر می‌رسد.

۲-۲. ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی

برای ساخت مدل شبکه عصبی مصنوعی از نرم‌افزار Easy NN 8.01 استفاده شده است.

به وسیله این نرم افزار می‌توان شبکه‌های پرسپترون چند لایه (MLP) مختلفی با یک تا سه لایه میانی ساخته و برای هر لایه نیز تعداد نرونهای مختلفی را استفاده نمود. از قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. امکان نمایش معماری شبکه عصبی مصنوعی، مقادیر وزن‌ها، خطاها، مقادیر بایاس، ورودی‌های خالص نرون‌ها و نمودار خطا بر حسب تعداد سیکل‌ها (Error-Cycles) به صورت گرافیکی.
۲. امکان به کارگیری معیارهای مختلف جهت پایان دادن به آموزش شبکه از قبیل کمتر شدن میانگین خطاها از یک مقدار مشخص، تعداد سیکل‌های مشخص، زمان سپری شده معین و غیره.
۳. امکان استفاده از حروف در داده‌های ورودی و خروجی به صورت مستقیم.
۴. امکان بکارگیری داده‌های ارزیابی شده و استفاده از آنها جهت پایان دادن به آموزش شبکه.
۵. تصحیح داده‌ها بین صفر و یک به صورت اتوماتیک.

۶. مشخص نمودن میزان تأثیر داده‌های ورودی و خروجی. با توجه به قابلیت ۶ می‌توان تعیین نمود که در بین ورودیها کدام یک تأثیر بیشتر و کدامیک تأثیر کمتری بر مقادیر خروجی دارد. مثلاً در تابع $f(x,y,z)=x^3+y+0.01z$; $(x,y,z \in N)$ متغیر x بیشترین تأثیر و متغیر z کمترین اثر را بر تابع f دارد که در این نرم‌افزار این مساله قابل تشخیص است [۱۷].

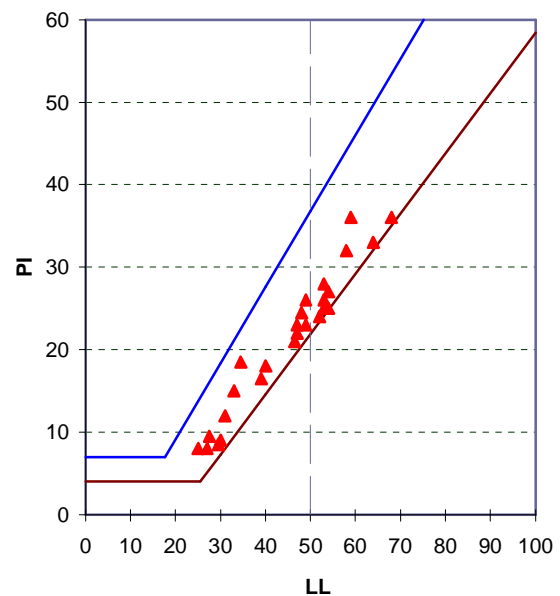
اولین قدم در ساخت یک مدل از شبکه عصبی مصنوعی، انتخاب نوع شبکه و نوع الگوریتم آموزش است. در نرم‌افزار یاد شده، از شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) و الگوریتم یادگیری انتشار برگشتی (Back propagation) استفاده شده است.

بانک مورد استفاده در این تحقیق یک مجموعه فراگیر از بررسی‌های انجام شده بر ۸ محل در نقاط مختلف کشور بوده است در نهایت ۲۰۳ داده قابل استفاده از آن استخراج شده است. تصمیم بر آن شد که آموزش شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از ۱۷۷ داده که به صورت تصادفی از بین ۲۰۳ داده مذکور، انتخاب شدند، انجام شود و ۲۶ داده نیز جهت استفاده در آزمایش نهایی شبکه، مورد استفاده قرار گیرند.

هر یک از داده‌های موجود در بانک اطلاعاتی شامل پارامترهای ω (درصد رطوبت طبیعی خاک)، σ_0 (فشار سربار)، PL (حد خمیری)، LL (حد روانی) و N (عدد نفوذ استاندارد) به عنوان

رطوبت، حدود اتربرگ، وزن مخصوص و آزمایش در جای SPT انجام و شرایط تنشهای درجای خاک (σ_0) نیز در هر مورد اندازه‌گیری شد.

تقریباً کلیه نمونه‌های به دست آمده از نوع رس بوده و در موارد نادری نیز در طبقه‌بندی لای قرار داشته‌اند. نمودار پلاستیسیته نمونه‌های برداشت شده از محل و به کارگرفته شده در آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار پلاستیسیته نمونه‌هایی که در آزمایش شبکه عصبی مصنوعی به کار رفتند

با افزایش فشار سربار، برای یک عدد ثابت (N) ، چسبندگی زهکشی نشده خاک کاهش می‌یابد.

زیرا مقاومت برشی خاک، به تنش همه جانبه آن مربوط است $[A]$ و لذا با ثابت بودن عدد SPT، که به نوعی متناظر با مقاومت نمونه است، برای نمونه‌های با فشار درجای همه‌جانبه بیشتر، در آزمایش تک محوری مقاومت برشی کمتری انتظار می‌رود.

به همین ترتیب، با ثابت ماندن فشار سربار، نمونه با عدد SPT بیشتر، مقاومت برشی بیشتری نیز خواهد داشت که باز هم با همان استدلال فوق قابل توجیه است.

همچنین رفتار خاک‌های ریزدانه با تغییرات درصد رطوبت تغییر می‌کند و خصوصیات خمیری خاک نیز در تعیین رفتار این خاکها مؤثر است.

با توجه به خطاهای موجود در آزمایش‌های درجا و آزمون‌های آزمایشگاهی و همچنین ارتباط بین پارامتر C_u و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به جای ترسیم نمودارهایی همچون نمودار Robertson-Campanella

این کار تازمانیکه همبستگی خوبی بین نتایج شبکه عصبی مصنوعی و نتایج آزمایشگاهی برقرار شود، ادامه یافت. معیار توقف آموزش، کمتر شدن میانگین خطا از 0.001 در نظر گرفته شد. همچنین نرخ آموزش 0.6 و مقدار مومنوم 0.8 در نظر گرفته شد. نمودار میانگین، حداکثر و حداقل خطاها بر حسب تعداد سیکل در شکل ۴ نشان داده شده است.

همچنین معماری نمایی شبکه شامل شکل گرافیکی لایه‌های شبکه، مقادیر نرونها، بایاس‌ها و مقادیر خطاها در شکل ۵ مشاهده می‌شود. پس از آموزش شبکه و اطمینان از صحت آن، اطلاعات آزمایشگاهی جدول ۱ که از آزمایش‌های درجا و آزمونهای آزمایشگاهی مربوط به ۲۶ خاک مختلف محل‌های اشاره شده بدست آمد، به کمک این شبکه ارزیابی گردید.

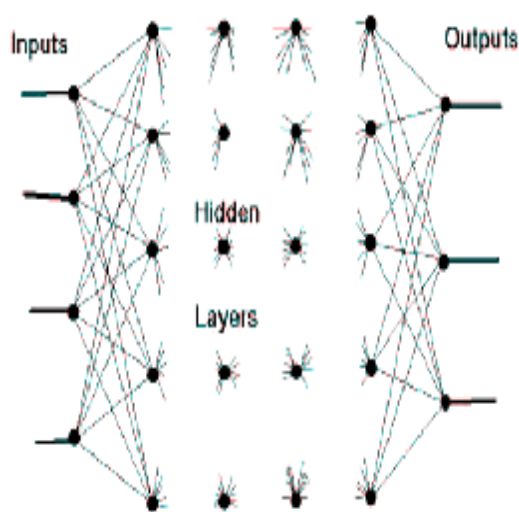
مقادیر پارامتر چسبندگی زهکشی نشده خاک (C_u) که از شبکه عصبی مصنوعی به دست آمده است همراه با مقادیر پارامتر مربوط به نتایج آزمایشگاهی در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین در این جدول مقادیر خطای نسبی که بر اساس نتایج آزمایشگاهی و شبکه عصبی مصنوعی تعیین شده، درج گردیده است.

با مراجعه به جدول ۲ و بررسی مقادیر خطای نسبی، ملاحظه می‌شود که به استثنای ردیف هفتم که دارای خطای نسبی $21/8\%$ است، در سایر موارد مقادیر خطای نسبی همواره از 10% کمتر است. نمودار نشان داده شده در شکل ۶ به مقایسه مقادیر مقاومت برشی بدست آمده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و آزمونهای آزمایشگاهی پرداخته است.

می‌توان چنین نتیجه گرفت که احتمال اشتباه در آزمایش ردیف ۷ بسیار زیاد است، چرا که دیگر نتایج از روندی نسبتاً مشخص و 16 که به نتایج آزمایشگاهی پیروی می‌کنند. چنین خطایی می‌تواند ناشی از پراکندگی داده‌ها در عدد SPT و یا عدم تبعیت نوع خاک آن قسمت از خاک‌های مورد استفاده در تبیین مدل (خاک رس) باشد.

به عنوان مثال عدد SPT در خاکهای درشت‌دانه و یا حتی در خاکهای ریزدانه، وقتی نوک مخروط SPT به سنگ یا لایه‌های موضعی مقاوم و یا سست برخورد می‌کند، دچار پراکندگی می‌شود که این خطا باید با توجه به نتایج آزمایشهای دیگر در همان ناحیه تصحیح شود. همچنین احتمال این امر نیز می‌رود که بالارفتن درصد خطا در موارد نادر، به رفتارهای ناشناخته خاک رس در شرایط خاص مثلاً وابستگی مقاومت به پارامتر دیگری در یک محل خاص یا نامنظم بودن تغییرات OCR با عمق، در قسمت‌هایی که خاک از لایه‌های متعدد تشکیل شده است، بازگردد. تفاوت‌های ناچیز در میزان آب محتوی، حدود اتربرگ، توزیع اندازه دانه‌ها و تفاوت در فشار بار اضافی برای نمونه‌هایی که از اعماق مختلف زمین برداشت شده‌اند، از دیگر فاکتورهایی است که در تغییر رفتار مواد به ظاهر یکسان اثر می‌گذارد. در مدل‌های دیگر شبکه عصبی مصنوعی و

پارامترهای ورودی و چسبندگی زهکشی نشده خاک رس (C_u) به عنوان پارامتر خروجی‌اند. با توجه به اینکه نرم‌افزار مورد استفاده، از تابع فعالیت غیر خطی سیگموئیدی $\text{Sig}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ (که تابع فعالیت مناسبی در حل مسایل مهندسی است) در لایه پنهان و لایه خروجی استفاده می‌کند و همچنین در حالت کلی هیچ دلیلی برای استفاده بیش از یک لایه میانی وجود ندارد، مگر در موارد بسیار مبهم که رابطه خوبی بین نتایج شبکه عصبی مصنوعی و نتایج آزمایشگاهی وجود ندارد [۱۸]، لذا تمام سعی و خطاها معطوف به تعیین تعداد نرونها در لایه میانی می‌شود. در شکل ۳ تصویری از یک شبکه عصبی با ۴ لایه میانی (پنهان) نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه‌ای از شبکه عصبی مصنوعی با ۴ لایه میانی

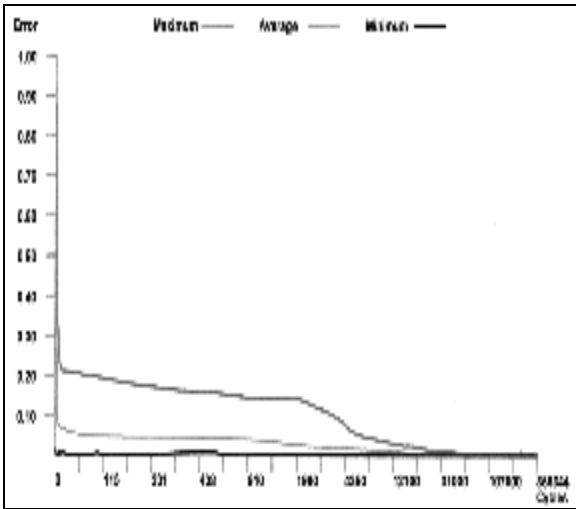
۳. نتایج و بحث‌ها

همانطور که اشاره شد، تغییرات درصد رطوبت و پارامترهای برگرفته از آن، بر خصوصیات خاک‌های ریزدانه تأثیر می‌گذارند.

لذا براساس نتایج به دست آمده از آزمونهای آزمایشگاهی و آزمایشهای درجا در محل‌های ذکر شده، برای تعیین C_u ابتدا مقادیر درصد رطوبت طبیعی خاک، حد روانی، حد خمیری، عدد SPT و فشار سربار و بر اساس آنها مقادیر متناظر چسبندگی زهکشی نشده نمونه‌ها به عنوان داده‌های آموزشی مورد استفاده قرار گرفت.

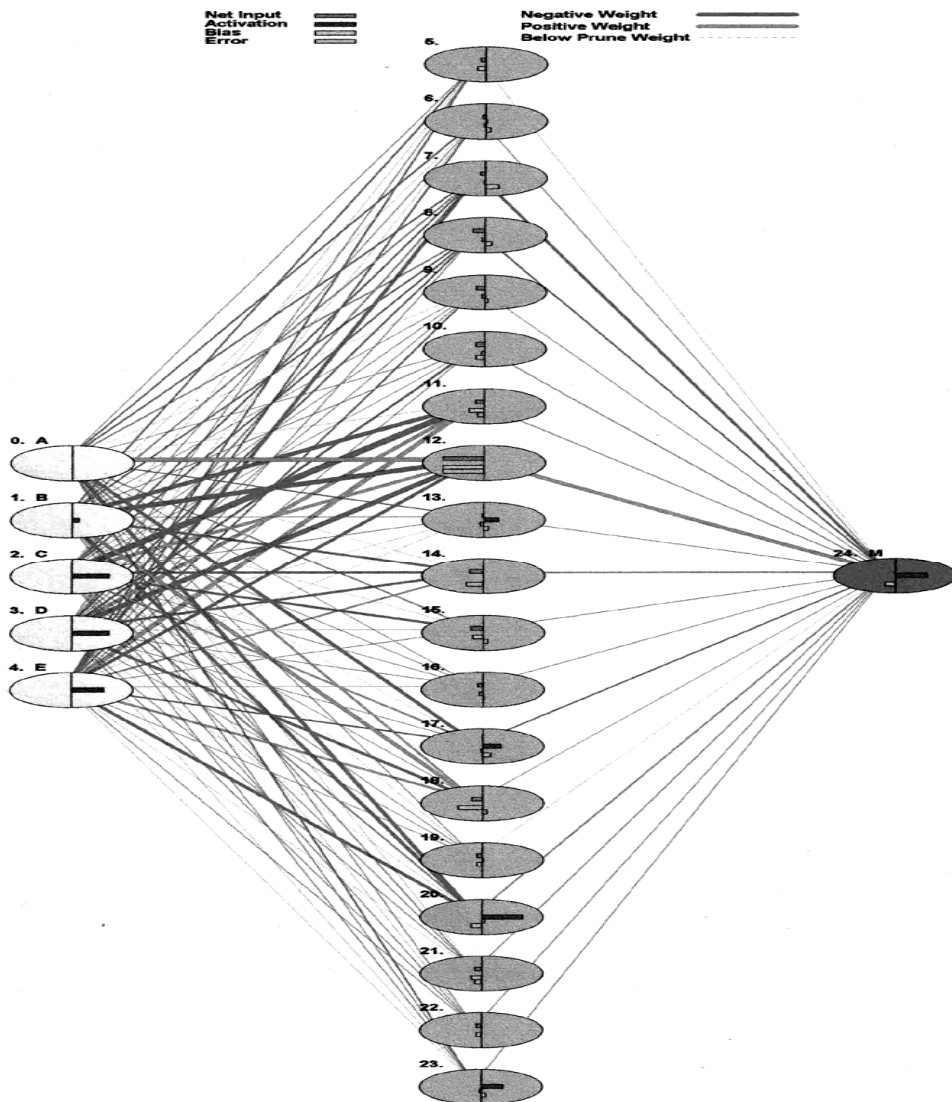
شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده، دارای یک لایه میانی با تعداد ۱۹ نرون است.

لازم به ذکر است که تعداد بهینه نرونها با سعی و خطا به دست آمد. بدین ترتیب که شبکه‌های عصبی مصنوعی با تعداد متفاوتی از لایه‌های میانی و نرون‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۴. نمودار میانگین، حداکثر و حداقل خطاها بر حسب تعداد سیکل

اضافه نمودن تأثیر این پارامتر، می‌توان از میزان این گونه خطاها کاست. استفاده از یک بانک اطلاعاتی وسیع‌تر می‌تواند ما را در آموزش هر چه بهتر شبکه عصبی مصنوعی یاری دهد. همچنین در انتخاب داده‌ها برای کاربرد در آموزش و آزمایش شبکه باید دقت لازم صورت پذیرد، زیرا بسیاری از آزمونهای آزمایشگاهی بر اساس استانداردها صورت نمی‌پذیرد [۶]. حداکثر خطای نسبی به دست آمده برابر با ۹/۷٪ و مربوط به ردیف ۲۱ است. همچنین ملاحظه می‌گردد در ۱۰ مورد یعنی در بیش از ۳۸٪ نمونه‌ها، جواب‌های حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و شبکه عصبی مصنوعی با هم مطابقت کامل دارند.



شکل ۵. نمایش گرافیکی لایه‌های شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل در تعیین چسبندگی زهکشی نشده [۱۹-۲۶]

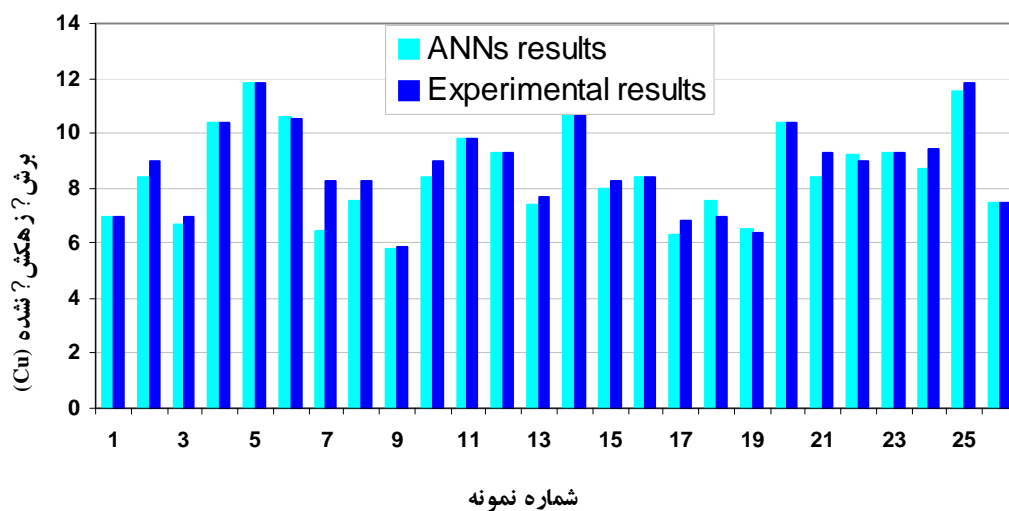
ردیف	محل	SPT-N	σ_0 (Kpa)	PL%	LL%	$\omega\%$
۱	نیروگاه مشهد	۳۹	۲۴۱/۹	۲۹	۵۴	۳۰
۲	نیروگاه کیش	۲۱	۱۴۴/۴	۳۲	۶۸	۳۴
۳	ینگی کند	۲۳	۲۵۵/۵	۲۸	۵۲	۲۸/۶
۴	نیروگاه کارزون	۲۱	۶۱/۲	۲۲/۵	۳۹	۱۹
۵	حاجی قشلاق	۲۶	۶۰	۱۸	۲۷/۵	۱۶
۶	ینگی کند	۳۹	۵۷	۲۴	۴۷	۲۲
۷	نیروگاه خوی	۴۹	۱۵۴	۲۳/۵	۴۸	۲۲
۸	نیروگاه خوی	۱۴	۱۵۹/۶	۱۸	۳۳	۲۱/۱
۹	خط انتقال ماهشهر	۲۰	۳۵۴/۴	۱۷	۲۵	۲۶/۱
۱۰	خط انتقال ماهشهر	۸	۱۰۷/۸	۱۹	۳۱	۲۵/۷
۱۱	حاجی قشلاق	۱۱	۸۵	۲۵	۴۷	۲۹/۵
۱۲	نیروگاه کیش	۱۰	۱۰۶/۳	۲۷	۵۴	۲۸/۳
۱۳	خط انتقال ماهشهر	۱۵	۱۹۷/۱	۲۶	۵۸	۲۰/۹
۱۴	حاجی قشلاق	۲۳	۳۴۱/۳	۱۹	۲۷	۲۶/۵
۱۵	نیروگاه مشهد	۴۵	۱۵۳	۲۵/۵	۴۶/۵	۲۳/۳
۱۶	ینگی کند	۲۲	۶۰/۴	۲۲	۴۰	۱۸
۱۷	حاجی قشلاق	۱۴	۱۹۱/۵	۲۵	۵۳	۲۲/۳
۱۸	نیروگاه کارزون	۱۱	۱۱۴/۵	۲۳	۵۹	۲۵/۲
۱۹	ینگی کند	۲۵	۵۹	۲۱	۳۰	۱۷/۴
۲۰	طرح قره دره	۱۶	۱۶۳/۴	۱۶	۳۴/۵	۲۰/۸
۲۱	طرح قره دره	۳۷/۵	۵۶/۴	۲۳	۴۹	۲۵
۲۲	خط انتقال ماهشهر	۲۳	۱۴۶	۳۱	۶۴	۳۱/۳
۲۳	خط انتقال ماهشهر	۳۷	۲۳۹/۳	۲۸	۵۳	۲۹
۲۴	حاجی قشلاق	۱۳	۱۰۱/۳	۲۱	۲۹/۵	۲۷
۲۵	ینگی کند	۲۴	۲۵۲/۵	۲۷	۵۳	۲۹/۳
۲۶	نیروگاه مشهد	۱۲	۷۸	۲۶	۴۹	۳۰/۳

جدول ۲. نتایج به دست آمده از مدل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۹-۲۶]

ردیف	محل	C_{u1} (Kg/cm ²) اساس مدل شبکه عصبی مصنوعی	C_{u2} (Kg/cm ²) بر اساس نتایج آزمایشگاهی	خطای نسبی (%)
۱	نیروگاه مشهد	۷	۷	۰
۲	نیروگاه کیش	۸/۴	۹	۶/۶
۳	ینگی کند	۶/۶۵	۷	۵
۴	نیروگاه کارزون	۱۰/۴	۱۰/۴	۰
۵	حاجی قشلاق	۱۱/۸	۱۱/۸	۰

دنباله جدول ۲. نتایج به دست آمده از مدل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۹-۲۶]

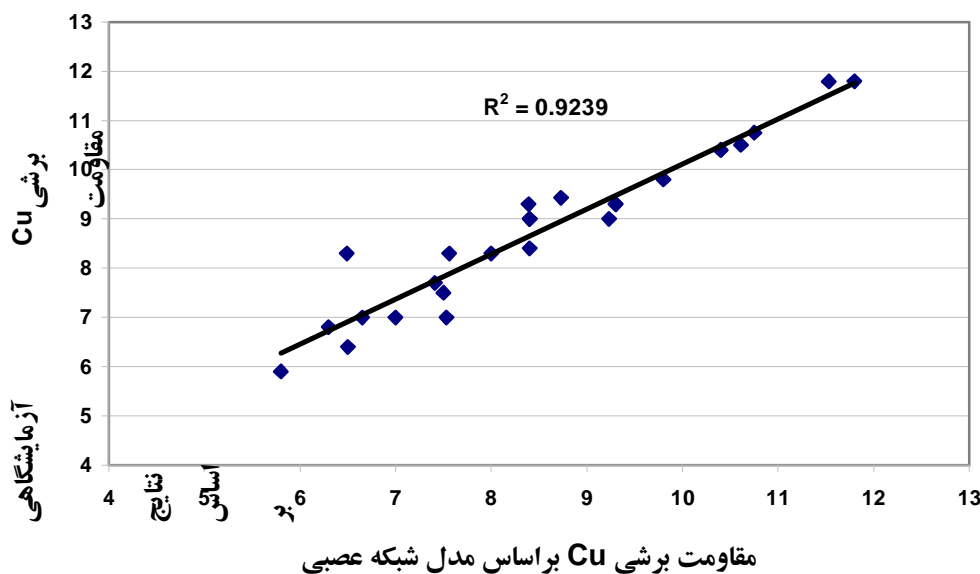
۶	ینگی کند	۱۰/۶۱	۱۰/۵	۱
۷	نیروگاه خوی	۶/۴۹	۸/۳	۲۱/۸
۸	نیروگاه خوی	۷/۵۶	۸/۳	۸/۹
۹	خط انتقال ماهشهر	۵/۸	۵/۹	۱/۶
۱۰	خط انتقال ماهشهر	۸/۴۰	۹	۶/۶
۱۱	حاجی قشلاق	۹/۸	۹/۸	۰
۱۲	نیروگاه کیش	۹/۳	۹/۳	۰
۱۳	خط انتقال ماهشهر	۷/۴۱	۷/۷	۳/۸
۱۴	حاجی قشلاق	۱۰/۷۵	۱۰/۷۵	۰
۱۵	نیروگاه مشهد	۸	۸/۳	۳/۶
۱۶	ینگی کند	۸/۴	۸/۴	۰
۱۷	حاجی قشلاق	۶/۳	۶/۸	۷/۴
۱۸	نیروگاه کازرون	۷/۵۳	۷	۷/۵
۱۹	ینگی کند	۶/۵	۶/۴	۱/۵
۲۰	طرح قره دره	۱۰/۴	۱۰/۴	۰
۲۱	طرح قره دره	۸/۳۹	۹/۳	۹/۷
۲۲	خط انتقال ماهشهر	۹/۲۳	۹	۲/۵
۲۳	خط انتقال ماهشهر	۹/۳	۹/۳	۰
۲۴	حاجی قشلاق	۸/۷۳	۹/۴۳	۷/۴
۲۵	ینگی کند	۱۱/۵۳	۱۱/۷۹	۲/۲
۲۶	نیروگاه مشهد	۷/۵	۷/۵	۰



شکل ۶. نمودار مقایسه مقاومت برشی بدست آمده از شبکه عصبی مصنوعی و آزمونهای آزمایشگاهی

مقادیر پارامتر چسبندگی زهکشی نشده خاک رس را بر اساس مقادیر درصد رطوبت، حد روانی، حد خمیری، عدد SPT و فشار سربار به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت بالا تعیین نمود.

با توجه به شکل ۷ دیده می‌شود که همبستگی خوبی بین نتایج بین نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی و آزمونهای آزمایشگاهی در تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده خاکها وجود دارد. بنابراین می‌توان



شکل ۷. نمودار همبستگی بین نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی و آزمونهای آزمایشگاهی

حقیقت مدلسازی و تعریف پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها، بسیار سودمند است.

۳. نتایج آزمونهای آزمایشگاهی و آزمایش‌های درجا در محل چندین پروژه در مناطق مختلفی از کشور (نیروگاه‌های کیش، ماهشهر، خوی، مشهد) نشان می‌دهد که بین نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (N_{SPT})، درصد رطوبت طبیعی، حدود اتربرگ، دامنه خمیری و فشار سربار خاک با چسبندگی زهکشی نشده خاک همبستگی وجود دارد. با مدل نمودن این پارامترها به زبان ریاضی، به کمک شبکه عصبی مصنوعی نتایج بسیار نزدیک به واقعیت به دست آمد که علاوه بر استفاده مستقیم از این مدل در تعیین پارامتر C_u خاک، می‌توان این مدل را جهت کنترل آزمونهای آزمایشگاهی هم به کار گرفت.

۴. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که حداکثر خطای نسبی به دست آمده برابر با ۹/۷٪ است و در ۱۰ مورد یعنی در بیش از ۳۸٪ نمونه‌ها، جواب‌های حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و شبکه‌های عصبی مصنوعی با هم مطابقت کامل دارند. بنابراین می‌توان مقادیر پارامتر چسبندگی زهکشی نشده خاک رس را به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت بالا تعیین نمود.

۵. مشاهده گردید که همبستگی مناسبی بین نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی و آزمونهای آزمایشگاهی در تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده خاکها وجود دارد. ضریب همبستگی $R^2 = 0.9239$ مبین این امر است.

۶. گفتنی است که هرچند آموزش شبکه عصبی مصنوعی با داده‌هایی انجام می‌گردد که خود دارای خطاست اما تأثیر این خطاها در برابر هزینه‌های انجام آزمونهای آزمایشگاهی بسیار ناچیز خواهد بود.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کلی

در مورد خاکهای ریزدانه، رفتار خاک به شدت متأثر از تغییرات درصد رطوبت و حدود روانی و خمیری خاک است. لذا استفاده از این پارامترها در مدل شبکه عصبی مصنوعی به همراه نتایج آزمایشهای درجای SPT می‌تواند به عنوان شاخصی جهت تعیین پارامترهای مقاومتی (که در حالت اشباع و زهکشی نشده به C_u محدود می‌شود) به کار گرفته شود.

نتایج بدست آمده نشان داد که با توجه به همبستگی مناسب بین نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی و نتایج حاصل از آزمونهای آزمایشگاهی می‌توان با به کار بردن این روش از انجام تعداد زیادی از آزمونهای آزمایشگاهی اجتناب به عمل آورد.

پس از بررسی نتایج مطالعات ژئوتکنیک مربوط به چندین محل که دارای لایه‌های خاک رس بودند و استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، در تعیین مقدار چسبندگی زهکشی نشده رس‌ها، با استفاده از نتایج فشار سربار، عدد SPT، درصد رطوبت طبیعی و حدود اتربرگ خاک، نتایج زیر به دست آمدند:

۱. نظر به اینکه شبکه عصبی مصنوعی توان بازتولید اطلاعات رفتاری مواد را، بدون احتیاج به دانستن سابقه رفتاری آنها داراست، می‌توان از آن جهت ساخت مدل‌های ساده رفتاری مواد استفاده کرد.

۲. نتایج مطالعات ژئوتکنیک، دارای خطاهای انسانی، محیطی و ایزاری هستند و لذا همواره قابل اعتماد نبوده و عموماً دقت در این داده‌ها پایین و ضرایب اطمینان در طراحی‌های ژئوتکنیکی بالا است. به دلیل وجود عوامل خطا، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و استفاده از بانک‌های اطلاعاتی قوی به عنوان پشتوانه‌ای جهت بالابردن دقت عملیات، در تصمیم‌گیری و در

[13] Eslami, A., and Fellenius, Bengt H., "Pile Capacity by Direct CPT and CPTu Methods applied to 102 case histories", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34, No. 6, December 1997, pp 886-904.

[14] Bowles, Joseph E., "Foundation Analysis and Design", 5th Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 1995.

[15] Wroth, C.P., "The Interpretation of In-situ Soil Tests", Geotechnique 34, No.4, 1984, pp. 449-489.

[16] Canadian Foundation Engineering Manual, CFEM, Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on foundations. BiTech Publications, Richmond, 1992.

[17] Manual of Easy NN 8.01, August 2001.

[18] Shea, P.M., and Liu, F., "Operational Experience with a Neural Network in the detection of Explosives in Checked Airline Luggage", IEEE Press, 1990, Vol.2.

[۱۹] مهندسين مشاور مشانير، "گزارش مطالعات ژئوتكنيك و زمين شناسي طرح نيروگاه كيش"، سال ۱۳۸۲.

[۲۰] مهندسين مشاور مشانير، "گزارش مطالعات ژئوتكنيك و زمين شناسي طرح نيروگاه گاري مشهد"، سال ۱۳۸۲.

[۲۱] مهندسين مشاور مشانير، "گزارش مطالعات ژئوتكنيك و زمين شناسي طرح نيروگاه كازرون"، سال ۱۳۸۲.

[۲۲] مهندسين مشاور مشانير، "گزارش مطالعات ژئوتكنيك و زمين شناسي طرح نيروگاه خوي"، سال ۱۳۸۲.

[۲۳] مهندسين مشاور مشانير، "گزارش مطالعات ژئوتكنيك و زمين شناسي طرح خط انتقال ماهشهر"، سال ۱۳۸۲.

[۲۴] مهندسين مشاور پي كاو، "گزارش نهايي مطالعات ژئوتكنيك طرح ينگي كند"، سال ۱۳۸۲.

[۲۵] مهندسين مشاور پي كاو، "گزارش نهايي مطالعات ژئوتكنيك طرح قره دره"، سال ۱۳۸۲.

[۲۶] مهندسين مشاور پي كاو، "گزارش نهايي مطالعات ژئوتكنيك طرح حاجي قشلاق"، سال ۱۳۸۲.

۷. در پايان اشاره مي شود كه فرآيند مدل سازي مشابه، درباره ارتباط بين ساير پارامترهاي خاك (مانند OCR با عمق و تنشهاي درجاي خاك)، قابل انجام است.

مراجع

[1] Topping, B.H.V., Bahreininejad, A., "Neural computing for structural mechanics". Edinburgh: Saxe-Coburg Publications, 1997.

[2] Berke, L., Hajela, P., "Application of artificial neural nets in structural mechanics". J Struct Optimizat 1992: 90-8.

[3] Ghaboussi, J., Garrent, Jr. JH, Wu X. "Knowledge-based modeling of material behaviour with neural networks". J Engng Mech ASCE 1990; 117(1): 53.

[4] Ellis, GW., Yao, C., Zhao, R., Penumadu, D., "Stress-strain modeling of sand using artificial neural networks". J Geotech Engng Div ASCE 1995; 121(5):429-35.

[5] Zhu, J-H., Zaman, MM., Anderson, S.A., "Modelling of Shearing behaviour of a residual soil with recurrent neural network". Int J Numer Anal Meth Geomech 1998, 22,671-87.

[6] Turk, G., Logar, J., Majes, B., "Modelling soil behaviour in uniaxial strain conditions by neural networks, Faculty of civil and geodetic engineering", University of Ljubljana, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenia, Advances in Engineering Software 32. 2001. 805-812.

[7] Dillon, T.S., and Niebur, D., "Neural Network Applications in Power Systems", CRL Publications, Leics, UK.

[8] Atkinson, J.H., and Bransby, P.L., "The Mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics", McGraw-Hill Book Co., UK, 375p., 1982.

[9] Holtz, R.D., and Kovacs, W.D., "An Introduction to Geotechnical Engineering", 1st Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 729 p., 1981.

[10] Muni Budho, "Soil Mechanics and Foundations", John Wiley and Sons, 2000.

[11] Campanella, R.G., Robertson, P.K., Davies, M.P., and Sy, A. "Use of in-situ tests in pile design. In Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering". ICSMFE, Rio de Janeiro, August 13-18, Vol. 1, 1989, pp. 199-203.

[12] Robertson, P.K., "In-situ Testing and its Application to Foundation Engineering", Canadian Geotechnical Journal, vol. 23, No. 4, 1986, pp. 573-394.