

تعیین عدد مدول نشست جانبو در خاک‌های رسی با استفاده از سرعت موج برشی (مطالعه موردی: شهر تبریز)

علیرضا علیزاده مجدی^۱، روزبه دبیری^{۲*}، نوید گنجیان^۳ و عباس قلندرزاده^۴

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران- ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران- ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
^۴ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۷/۲/۸، پذیرش: ۹۷/۱۱/۶، نشر آنلاین: ۹۷/۱۱/۶)

چکیده

نشست تحکیمی یکی از نگرانی‌های ژئوتکنیکی پروژه‌ها در مناطق با لایه‌های رسی می‌باشد. روش‌های متداول مطالعه این موضوع نیاز به صرف زمان قابل توجه دارد. برای ارزیابی نشست تحکیم عمدتاً از تئوری‌های Terzaghi (۱۹۲۳) و Janbu (۱۹۶۳) استفاده می‌شود. امروزه یکی از موضوعات مورد علاقه محققان به منظور ارزیابی این نشست، بررسی روابط تجربی و روش شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و خمیری و اخیراً سرعت موج برشی می‌باشد. بدین ترتیب با تعیین سرعت موج برشی، ضرایب نشست از جمله عدد مدول نشست جانبو به کمک این روش‌ها برآورد شده و ارزیابی پتانسیل نشست پذیری یک منطقه با صرف زمان و هزینه کمتر عملی خواهد بود. شهر تبریز واقع در شمال غربی ایران، دارای انواع خاک‌های ریزدانه رسی، سیلتی و انواع مارن (زرد، سبز و خاکستری) با پتانسیل نشست‌پذیری مختلف تحکیم می‌باشد. در این تحقیق با حفاری سه گمانه ماشینی به عمق تا ۸ متر، آزمایشات کامل فیزیکی، خمیری و تحکیم بر روی ۲۰ نمونه خاک دست نخورده انجام گردید. از آزمایش‌های صحرایی درون چاهی نیز برای تعیین سرعت موج برشی در گمانه‌ها استفاده شد. تا حد امکان از نتایج مطالعات ژئوتکنیکی موجود در محدوده تحقیق نیز استفاده شده و در مجموع بانک اطلاعاتی با ۳۷ سری از خصوصیات نشست و سرعت موج برشی تهیه گردید. پس از تفسیر آماری و تعیین ضریب همبستگی بین داده‌های تحقیق و عدد مدول جانبو، روابط تجربی موجود با داده‌های تحقیق صحت‌سنجی گردید. با استفاده از رگرسیون خطی و غیر خطی، روابط تجربی بین عدد مدول جانبو و سرعت موج برشی مطالعه شده و بر اساس کلیه داده‌های موجود شامل ۲۲۹ سری داده صحت‌سنجی و مقایسه انجام گردید. روابط پیشنهادی، مخصوصاً رابطه نمایی با ضرایب آماری ($CR=0.999, RMSE=0.2257, R^2=0.786$) نسبت به روابط موجود کارایی بهتری نتیجه می‌دهند. همچنین به منظور برآورد عدد مدول جانبو، شبکه عصبی مصنوعی با ۸ متغییر ورودی شامل خصوصیات فیزیکی و خمیری به همراه سرعت موج برشی مطالعه و نتایج با روابط تجربی نیز مقایسه گردید. شبکه عصبی با دو لایه پنهان و ۱۵ نرون مخفی در هر لایه بهترین کارایی را نتیجه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: عدد مدول جانبو، سرعت موج برشی، خاک‌های رسی، مارن تبریز، روابط تجربی، شبکه عصبی مصنوعی.

۱- مقدمه

نشست تحکیمی نیاز به صرف زمان و هزینه قابل توجه دارد، نتایج آزمایشات به دلیل بروز خطاهای ناشی از نمونه‌گیری، دست خوردگی و هوازدگی، می‌تواند چالش برانگیز باشد. امروزه یکی از موضوعات مورد علاقه محققان مختلف در سراسر دنیا بررسی روش‌هایی جهت ایجاد سهولت به منظور ارزیابی نشست تحکیمی می‌باشد. یکی از ایده‌ها استفاده از روش‌های ژئوفیزیک در ارزیابی پتانسیل نشست تحکیمی لایه‌های رسی می‌باشد. استفاده از سرعت موج برشی در لایه‌ها به عنوان یک پارامتر مهم بیشتر

نشست تحکیمی یکی از مشکلات ژئوتکنیکی در مناطق مختلف دنیا از جمله ایران می‌باشد. به منظور ارزیابی این پدیده لازم است گمانه‌هایی به تعداد کافی حفاری شده و نمونه‌های دست نخورده از لایه‌های رسی تهیه گردد. سپس آزمایشات تعیین خصوصیات فیزیکی معمول خاک و همچنین آزمایش تحکیم در دستگاه متداول ادنومتر در آزمایشگاه بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد. لذا ضمن این که روش معمول ارزیابی پتانسیل

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۱۱۶۱۴۰۰

که در آن تنش پیش تحکیم لایه و m_r عدد مدول تانژانت مرحله باربرداری می‌باشد. اگر تنش وارده از تنش پیش تحکیم تجاوز نکند رابطه کرنش به صورت زیر خواهد بود:

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} \ln\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}\right) \quad (5)$$

تنها پارامتر لازم برای محاسبه نشست لایه طبق رابطه (۳)، عدد مدول نشست جانبی (m) خواهد بود. این عدد از آزمایشات متداول آزمایشگاهی و صحرایی قابل تعیین می‌باشد. برای رس‌ها و سیلت‌ها، مدول بارگذاری مجدد (m_r) اغلب ۵ الی ۱۲ برابر m می‌باشد. تبدیل مستقیم ساده‌ای بین m در تئوری جانبی و شاخص فشردگی در تئوری ترزاقی به صورت زیر وجود دارد (Fellenius, ۲۰۰۶).

$$m = \frac{\ln(10)(1+e_0)}{C_c} = \frac{2.3(1+e_0)}{C_c} \quad (6)$$

۲-۲- مرور سوابق تحقیق

در سال‌های اخیر با توسعه آزمایشات صحرایی از قبیل درون چاهی و میان چاهی، امواج پیوسته، تحلیل طیفی امواج سطحی و تحلیل چند کاناله موج سطحی، آزمایش مخروط لرزه‌ای و یا آزمایشات آزمایشگاهی از قبیل المان خمشی، سرعت موج برشی در لایه‌ها به عنوان یکی از پارامترهای مهم خاک، به سهولت و با دقت مناسب قابل تعیین می‌باشد. ارتباط بین سرعت موج برشی با سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌ها مانند خصوصیات خمیری و مدول برشی خاک‌های رسی (Long و Donohue, ۲۰۱۰)، مدول برشی (Knusen, ۲۰۱۴)، فشار سکون خاک‌های رسی (Tong و همکاران، ۲۰۱۳)، فشار پیش تحکیم یافته (Toon و همکاران، ۲۰۱۱)، آنیزوتروپی خاک (Nishimura, ۲۰۰۵)، مقاومت برشی (Mandar و همکاران، ۲۰۱۰) و حتی انواع پدیده‌های خاک از قبیل پتانسیل روانگرایی در انواع خاک‌های سیلتی (Nutash و همکاران، ۲۰۱۲) مطالعه می‌گردد. همچنین امروزه از تغییرات سرعت موج برشی به منظور بررسی و ارزیابی پدیده تحکیم خاک‌های رسی نیز استفاده می‌شود که در ادامه به خلاصه‌ای از اهم این تحقیقات اشاره می‌شود.

طی تحقیقاتی که توسط L'Heureux و همکاران (۲۰۱۳) و (۲۰۱۶) بر روی رفتار نشست دراز مدت لایه‌های ضخیم رسی اشباع در اثر احداث خاکریز در کشور نروژ انجام شده، با تعیین سرعت موج برشی به وسیله روش‌های ژئوفیزیک، نشست تحکیمی براساس تئوری جانبی برآورد گردید. نتایج به مقادیر اندازه‌گیری شده در مقایسه با نتایج روش محاسبه متداول

مورد توجه می‌باشد. بدین منظور همبستگی سرعت موج برشی با ضرایب تئوری‌های متداول موجود شامل تئوری ترزاقی^۱ و تئوری جانبی^۲ برای برآورد نشست تحکیمی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نشست تحکیمی برای اولین بار توسط ترزاقی در سال ۱۹۲۳ با مفهوم افزایش تنش مؤثر در خاک‌های ریزدانه اشباع مطرح گردیده که با تعیین شاخص فشردگی (C_c) محاسبه می‌گردد (Amiri و همکاران، ۲۰۱۴). تئوری نشست جانبی در دهه ۶۰ پیشنهاد گردید. در راهنمای مهندسی پی کانادا^۳ به استفاده از این تئوری ارجاع شده است (Fellenius, ۲۰۰۶).

امروزه از تئوری جانبی مانند تئوری ترزاقی برای محاسبات نشست، نه تنها در لایه‌های ریزدانه رسی (L'Heureux و همکاران، ۲۰۱۶) بلکه برای لایه‌های ماسه‌ای (Tong و همکاران، ۲۰۱۳) و سیلتی (Carrol, ۲۰۰۷) نیز استفاده می‌شود. در تئوری جانبی، رابطه بین تنش و کرنش به صورت تابعی از دو پارامتر معین مربوط به نوع خاک، شامل توان تنش (j) و عدد مدول جانبی (m) به صورت زیر می‌باشد (Fellenius, ۲۰۰۶).

$$M = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = m \cdot \sigma_r \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_r}\right)^{1-j} \quad (1)$$

که در آن σ'_r تنش مؤثر، ε کرنش ناشی از افزایش تنش مؤثر و σ'_p تنش مرجع برابر با ۱۰۰ Kpa می‌باشد. پارامتر j برای خاک‌های چسبنده صفر می‌باشد. رابطه مدول تانژانت در رفتار خمیری خاک‌های رسی با توان تنش ($J=0$) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$M = m \cdot \sigma' \quad (2)$$

با جاگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱) و انتیگرال گیری، رابطه زیر برای محاسبه کرنش در خاک چسبنده با تحکیم عادی به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}\right) \quad (3)$$

که در آن σ'_0 تنش مؤثر اولیه و σ' تنش بارگذاری می‌باشد. غیر از لایه‌های خیلی جوان یا آلی اکثر لایه‌ها دارای پیش تحکیم یافتگی می‌باشند. بنابر این در خاک‌های چسبنده پیش-تحکیم یافته، رابطه فوق برای محاسبه کرنش به صورت زیر به کار می‌رود:

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} \ln\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}\right) + \frac{1}{m} \ln\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_r}\right) \quad (4)$$

حالت تنش‌های موجود خاک انجام شده و نتیجه آزمایش به پاسخ حجم بزرگی از توده خاک مربوط می‌شود. امروزه روش‌های اندازه‌گیری صحرایی سرعت موج برشی، روش ترجیحی در دنیا می‌باشد (L'Heureux و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیق حاضر ارزیابی عدد مدول نشست جانبی بر روی نمونه‌های متنوع خاک-های رسی و مارنی شهر تبریز با استفاده از تعیین سرعت موج برشی به کمک آزمایش درون چاهی، به عنوان یکی از آزمایشات متداول و مهم لرزه‌ای مطالعه شده است.

۳-۲- معرفی زمین‌شناسی عمومی محدوده مورد مطالعه

مارن در خیلی از مناطق ایران رخنمون دارد. این لایه‌ها در مناطقی از شهر تبریز (واقع در شمال غرب ایران) نیز گسترش یافته است. سن زمین‌شناسی این مارن‌ها به دوران میوسن و پلیوسن بر می‌گردد. مارن‌های تبریز به بستر باغمیشه^۵ متعلق می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی بستر باغمیشه بین بستر قرمز بالایی و بستر ماهی متعلق به دوران پلیوسن قرار می‌گیرد. لایه‌بندی ستونی خاک‌های رسی شهر تبریز در جدول (۱) ارائه شده است. این لایه‌ها در اثر حرکات تکتونیکی اواخر دوران سوم زمین‌شناسی دچار چین‌خوردگی و گسلش شده‌اند (Hooshmand و همکاران، ۲۰۱۲). از جمله رودخانه‌های مهم منطقه مهران رود می‌باشد که از قسمت تقریباً مرکزی محدوده تحقیق عبور می‌کند. سه گمانه تحقیقی با جانمایی طبق شکل (۱) بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه برای تهیه نمونه‌های متنوع از خاک‌های رس سیلتی ماسه‌ای برنگ قرمز رنگ با رخنمون در نواحی شمالی منطقه تا تناوبی از مارن‌های زرد و سبز گچ‌دار در قسمت‌های شرقی و جنوبی منطقه حفاری گردید.

جدول ۱- لایه‌بندی مارن تبریز

(Hooshmand و همکاران، ۲۰۱۲)

کواترنری	آبرفت
پلیوسن	لایه‌های حاوی فسیل‌های ماهی (شامل مارن، سنگ‌های کوچک آتشفشانی و دیاتومیت)
میوسن	بستر باغمیشه (شامل مارن همراه با شیل و لیگنیت) لایه‌های بالایی قرمز رنگ (شامل مارن، سنگ ماسه و لای سنگ)

نشست، نزدیک‌تر بوده است (L'Heurux و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶).

در تحقیقی که بر روی نهشته‌های نرم ساحلی اشباع توسط Nor Omar و همکاران، (۲۰۱۱) در کشور مالزی انجام گرفت، با بارگذاری سطح خاک به مدت ۳۰۰ روز میزان نشست اندازه‌گیری شده با مقدار نشست محاسبه شده با استفاده از تعیین سرعت موج برشی به وسیله روش‌های ژئوفیزیک مقایسه شده و استفاده از سرعت موج برشی به عنوان یک پارامتر مهم در محاسبات پیش‌بینی نشست دراز مدت مورد تأیید قرار گرفت. در تحقیقات انجام شده توسط Mandar و همکاران (۲۰۱۰) از سرعت موج برشی تعیین شده بروش المان خمشی^۴ بر روی ۱۳۰ نمونه خاک در کشور هند، روابط تجربی برای تعیین خصوصیات مختلف لایه-های رسی از جمله تخلخل، شاخص فشردگی و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک پیشنهاد گردید. تحقیقات زیادی بر روی ارتباط بین تغییرات سرعت موج برشی با پارامترهای سختی خاک در آزمایشگاه در حین فرآیند تحکیم بر روی نمونه‌های مختلف خاک‌های چسبنده توسط محققان مختلف از جمله Fam و Santamarina، (۱۹۹۷) و Likitlersuang و همکاران (۲۰۱۳) و Landon و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از المان خمشی انجام گرفته است. با توجه به تنوع خاک‌های چسبنده لزوم انجام تحقیقات بیشتر بر روی خاک‌های چسبنده مناطق مختلف همواره تأکید شده است.

انجام آزمایشات آزمایشگاهی با نمونه‌های با کیفیت خیلی بالا و دست نخورده اغلب در رس‌های حساس و نرم کار پر هزینه و سخت می‌باشد. به علاوه تعیین سرعت موج برشی در آزمایشگاه برای نمونه‌های مجزا از هم بوده و نمی‌تواند نمایشگر پروفیل خاک باشد. لذا استفاده از روش‌های ژئوفیزیک در تعیین سرعت موج برشی به منظور ارزیابی ضرایب نشست تحکیم لایه‌ها می‌تواند مناسب‌تر باشد. روش‌های ژئوفیزیک لرزه‌ای در مهندسی ژئوتکنیک، اولین بار توسط ترزاقی Terzaghi در سال ۱۹۴۳ معرفی گردید (Nor Omara و همکاران، ۲۰۱۱).

با استفاده از روش‌های ژئوفیزیک، از پیچیدگی‌ها و نارسائی-های نمونه‌گیری خاک و اثرات دست خوردگی نمونه جلوگیری می‌شود. البته ارجح خواهد بود تا نتایج این روش‌ها با حفر گمانه-های کنترلی و یا اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شوند. برخلاف آزمایشات آزمایشگاهی، آزمایشات صحرایی در



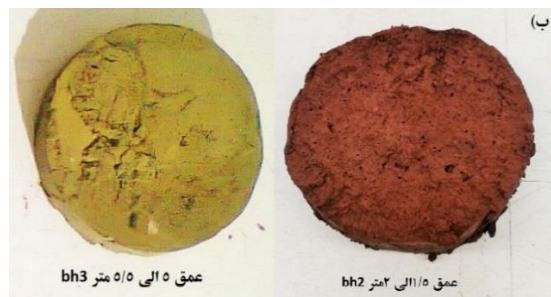
شکل ۱- موقعیت گمانه‌های تحقیقی و داده‌های قابل استفاده (www.Google.com/earth/2016)

گمانه‌های حفاری: bh1,2,3 گمانه‌های موجود (NBh1-3, Gbh1, Vbh1, pbh1, Tbh3, Tbh8, TL2e4,6)

$$V_{S1} = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^n V_{S0} \quad (7)$$

که در این روابط P_a و σ'_v به ترتیب تنش مؤثر قائم و فشار هوا بر حسب کیلوپاسکال بوده و V_{S0} سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده می‌باشد. توان n با توجه به نوع آزمایش تعیین سرعت موج برشی و نوع خاک انتخاب می‌شود.

سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد تحقیق بالا بوده و در محدوده عمق حفاری گمانه‌ها قرار دارد. در سایر مناطق شهر و عمدتاً در نواحی جنوب و غرب شهر رسوبات دانه‌ای متراکم یا کنگلومرای نیمه سخت به همراه میان لایه‌هایی از ماسه و سیلت تا رس مربوط به دوران پلیوکوآترنی بر روی سازند مارنی قرار گرفته است.



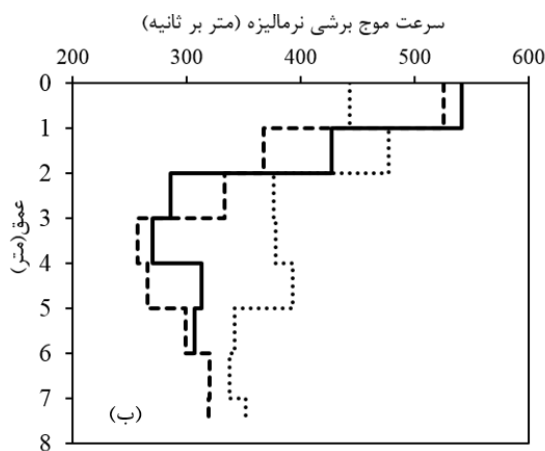
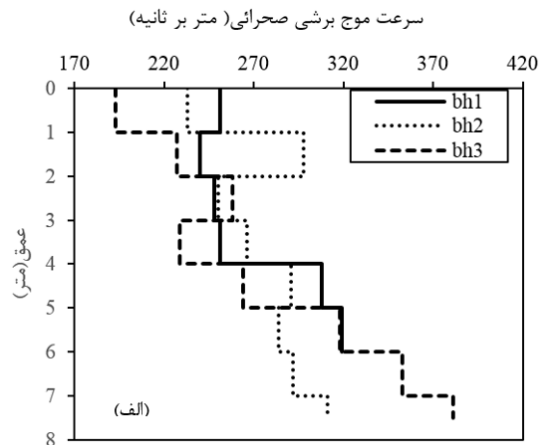
شکل ۲- الف) گمانه آماده شده برای آزمایش درون چاهی،

ب) مقطع دو نمونه خاک

۲-۴- نحوه آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها

سه گمانه ماشینی (bh1, 2, 3) با موقعیت‌های طبق شکل (۱) به روش دورانی به عمق‌های تا ۸ متری حفاری شده و از حدود هر یک متر یک نمونه دست‌نخورده تیوبی جدار نازک و در کل ۲۰ نمونه تهیه گردید. نمونه‌های دست‌نخورده برای آزمایش تحکیم در دستگاه ادنومتر طبق روش (ASTM-D2435-03) مورد استفاده قرار گرفتند. بر روی نمونه‌های دست‌خورده تهیه شده از هر عمق نیز آزمایشات کامل تعیین خصوصیات فیزیکی خاک شامل چگالی ویژه دانه‌ها (ASTM-D854-14)، تعیین درصد ذرات (ASTM-D422-63)، درصد رطوبت نمونه‌ها (ASTM D2216-98)، حدود اتربرگ (ASTM-D4318-93) و طبقه‌بندی (ASTM D2487-93) انجام گردید. آزمایش درون چاهی^۶ به روش استاندارد (STM-D7400-08) در هر گمانه انجام شده و از هر حدود یک متر سرعت موج برشی اندازه‌گیری گردید. تصاویری از نمونه‌ها و یکی از گمانه‌ها در شکل (۲) ارائه شده است.

از آن جایی که خصوصیات مقاومتی و فشردگی خاک توسط تنش مؤثر قائم (σ'_v) کنترل می‌شود. لازم است سرعت موج برشی نسبت به تنش مؤثر قائم در هر عمق طبق رابطه زیر نرمالیزه گردید.



شکل ۳- تغییرات سرعت موج برشی در گمانه‌های تحقیق

ضریب همبستگی اسپیرمن^۷ بین پارامترهای تحقیق و عدد مدول نشست جانبی توسط نرم‌افزار SPSS محاسبه گردیده و در شکل (۵) نشان داده شده است. ضریب همبستگی سرعت موج برشی نرمالیزه نسبت به عدد مدول نشست جانبی برابر ۰/۵۰۰ و بزرگتر از ضریب همبستگی سایر متغیرها به غیر از شاخص فشردگی می‌باشد. این همبستگی از نوع مثبت بوده به عبارت دیگر با افزایش سرعت موج برشی، مقدار عدد مدول جانبی نیز افزایش می‌یابد.

در این تحقیق با توجه به نوع خاک‌های رسی منطقه و استفاده از آزمایش درون چاهی، طبق تحقیقات Rix و Mayne (۱۹۹۳) توان رابطه برابر ۰/۵۶ انتخاب گردید. کلیه محاسبات مربوط به تعیین عدد مدول نشست جانبی، شاخص فشردگی (C_c) و فشار پیش تحکیم (P_c) برای داده‌های موجود، مربوط به مطالعات پروژه قطار شهری تبریز و آرشیو سازمان نظام مهندسی استان آذربایجان شرقی نیز انجام گردید در نهایت با تکمیل ۱۷ سری از این اطلاعات به همراه نتایج ۲۰ آزمایش انجام یافته در این تحقیق، در مجموع بانک اطلاعاتی شامل ۳۷ سری از داده‌های تحقیق برای منطقه تهیه و تکمیل گردید.

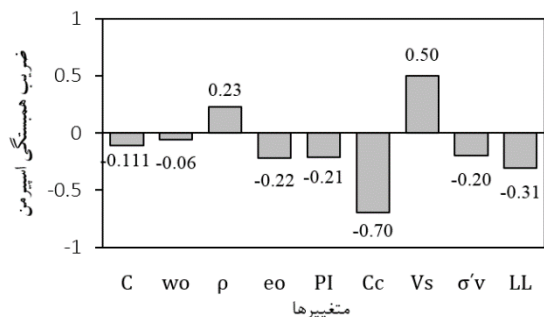
۳- نتایج و بحث

۳-۱- توصیف آماری داده‌ها

پروفیل سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده به روش درون چاهی در دو حالت صحرائی و نرمالیزه شده بر حسب تنش مؤثر قائم نسبت به عمق گمانه‌ها طبق شکل (۳) ارائه شده است. با رسم منحنی تغییرات تنش- کرنش در آزمایش تحکیم، مدول تانژانت جانبی (M) محاسبه گردید. با رسم تغییرات (M) نسبت به تنش مؤثر قائم و با محاسبه شیب بهترین خط گذرنده از نتایج، عدد مدول نشست جانبی برای هر نمونه تعیین گردید. به عنوان نمونه نتایج گمانه (bh3) در شکل (۴-الف) ارائه شده است. لذا پارامتر توان برای خاک منطقه صفر بوده ($J=0$) و رفتار تنش- مدول تانژانت جانبی خاک با رفتار خمیری تطابق دارد. نمودار تغییرات عدد مدول نشست جانبی نسبت به عمق در کلیه گمانه‌ها مربوط به انواع خاک‌های رسی شهر تبریز طبق شکل (۴-ب) ارائه شده است.

توصیف آماری ۳۷ سری از داده‌های تحقیق شامل چگالی ویژه دانه‌ها (G_s)، درصد ذرات رسی (c)، حد روانی (LL)، دامنه خمیری (PI)، دانسیته طبیعی (ρ)، درصد رطوبت طبیعی (w_n) شاخص فشردگی (C_c)، سرعت موج برشی نرمالیزه (V_{s1}) و عدد مدول نشست جانبی (m) به کمک نرم‌افزار SPSS (V.16, 2007) انجام گردیده و به طور خلاصه طبق جدول شماره (۲) ارائه شده است. سعی شد تا حد امکان بانک اطلاعاتی شامل محدوده گسترده‌ای از انواع خاک‌های چسبنده محدوده تحقیق با دامنه خمیری کم تا ۴۵ درصد، تخلخل طبیعی ۰/۳۹ الی ۱/۰۵، سرعت موج برشی نرمالیزه شده بین ۲۳۴ الی ۶۹۴ متر بر ثانیه و عدد مدول جانبی بین ۱۴/۳۸ الی ۴۱/۳۹ گردد. با توجه به خصوصیات خمیری، نمونه‌های خاک‌های رسی در گستره شهر تبریز براساس روش طبقه‌بندی یونیفاید در رده خاک‌های (CL, CH, ML, MH) قرار می‌گیرند.

7. Spearman correlation coefficient



شکل ۵- همبستگی اسپیرمن بین متغیرها و عدد مدول جانبی

۲-۲- روابط تجربی موجود

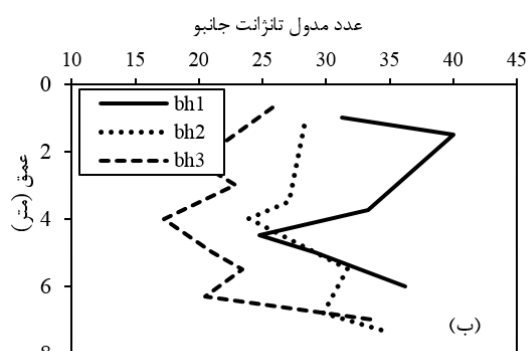
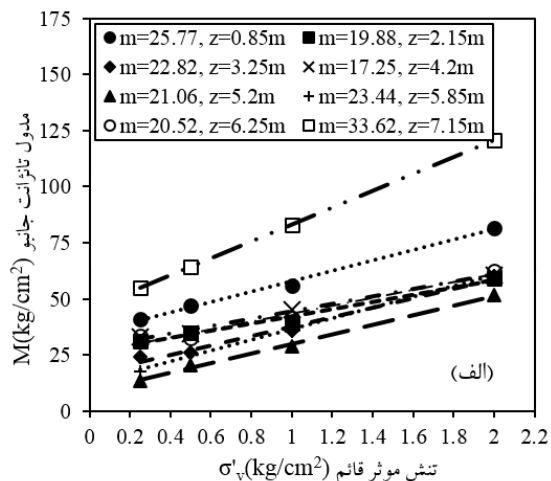
رابطه زیر برای تعیین عدد مدول جانبی (m) براساس سرعت موج برشی (V_s) مربوط به مطالعات اخیر L'Heureux و همکاران، (۲۰۱۳) بوده که از نتایج آزمایش بر روی حدود ۴۷ نمونه دست نخورده از رس نرم و اشباع نقاط مختلف کشور نروژ با سرعت موج برشی کوچکتر از ۲۰۰ متر بر ثانیه و با مقدار ضریب تبیین^۸ ($R^2 = 0.52$) به دست آمده است.

$$m = 0.063 V_s + 6.36 \quad (8)$$

بر اساس داده‌های این تحقیق مربوط به خاک‌های رسی و مارن شهر تبریز با سرعت موج برشی بزرگتر از ۲۰۰ متر بر ثانیه، رابطه فوق صحت‌سنجی گردید. اختلاف عدد مدول محاسبه شده طبق رابطه مذکور با مقدار تعیین شده از نتایج آزمایشات با معیارهای آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا^۹ با رابطه (۹)، ضریب تبیین^{۱۰} و شیب خط همبستگی^{۱۱} در مختصات ($m_{mi}-m_{pi}$) طبق شکل (۶) ارزیابی گردید. در این روابط m_{mi} عدد مدول اندازه‌گیری شده، m_{pi} عدد مدول محاسبه شده با رابطه (۸)، m_{ave} مقدار متوسط عدد مدول اندازه‌گیری شده و N تعداد نمونه‌های تحقیق مربوط به خاک‌های رسی شهر تبریز می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_{mi} - m_{pi})^2}{N}} \quad (9)$$

نتیجه ارزیابی این رابطه برابر ضریب تبیین ($R^2 = 0.220$)، خطای ($R^2 = 0.247$) و شیب خط رگرسیون ($CR = 0.895$) بوده و نشانگر رگرسیون ضعیف بین رابطه مذکور و داده‌های تحقیق حاضر می‌باشد. در این تحقیق سعی گردیده تا با استفاده از داده‌های تحقیق و داده‌های موجود در ادبیات فنی مربوطه، این رابطه برای خاک‌های با سرعت موج برشی بزرگتر تعمیم داده شود.



شکل ۴- الف) تغییرات مدول تانژانت جانبی در گمانه (bh-3) (ب) تغییرات عدد مدول تانژانت جانبی نسبت به عمق گمانه‌ها

جدول ۲- توصیف آماری داده‌های مطالعه ($N=37$)

Variable	Min.	Max.	Mean	Sta. Dev.
Gs	۲/۶۰	۲/۸۸	۲/۷۰	۰/۰۶۹
C (%)	۷/۱۰	۶۰/۱۰	۳۳/۱۸	۱۳/۴۰۳
LL (%)	NP*	۷۷/۰۰	۴۹/۱۹	۱۱/۸۶۴
PI (%)	NP	۴۵/۰۰	۲۳/۴۵	۹/۱۴۷
ρ (gr/cm ³)	۱/۸۴	۲/۱۸	۲/۰۱	۰/۰۸۰
w _n (%)	۱۵/۱	۳۶/۹۵	۲۵/۸۰	۴/۹۷۲
e _o	۰/۳۹۰	۱/۰۵۰	۰/۷۱۰	۰/۱۵۷
Cc	۰/۰۹۰	۰/۲۶۰	۰/۱۵۴	۰/۰۴۲
V _{s1} (m/s)	۲۳۴/۰۰	۶۹۳/۵۰	۳۶۰/۱۱	۱۰۶/۴۶۲
m	۱۴/۳۸	۴۱/۳۹	۲۶/۴۹	۶/۵۹

* نمونه خاک عمق ۴ الی ۴/۵ متری گمانه bh2 غیرخمیری می‌باشد.

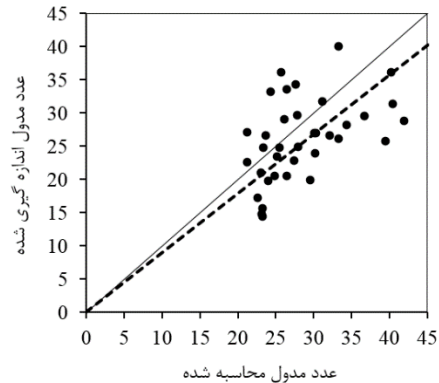
10. Determination coefficient, R2
11. The slope of the correlation line, CR

8. Determination coefficient
9. Root mean square error, RMSE

RMSE و شیب خط رگرسیون CR نسبت به رابطه (۸) کارائی بهتری دارند. کارائی کل روابط پیشنهادی نسبت به رابطه موجود نیز در شکل‌های (۷) ارائه شده است.

۳-۴- صحت‌سنجی و مقایسه نتایج روابط پیشنهادی

به منظور صحت‌سنجی روابط پیشنهادی به همراه رابطه موجود، از کل داده‌های موجود خاک‌های سایر مناطق نیز استفاده گردید. همانگونه که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، از داده‌های مرجع Mander و همکاران (۲۰۱۰) در خصوص برآورد شاخص فشردگی بر اساس سرعت موج برشی نرمالیزه شده مربوط به ۱۳۰ نمونه از رسوبات نرم و اشباع در کشور هندوستان و تحقیقات Erzlin و Yilmaz (۲۰۰۴) در خاک‌های رسی کشور ترکیه شامل ۶ نمونه و داده‌های تحقیقات London و همکاران (۲۰۰۷) بر روی رس بوستون در آمریکا شامل ۹ داده و در مجموع ۱۴۵ سری داده برای صحت‌سنجی استفاده شد. این داده‌ها عموماً مربوط به خاک‌های نرم رسی با سرعت موج برشی کوچک‌تر از ۱۵۰ متر بر ثانیه می‌باشند. عدد مدول نشست جانبی برای این نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۶) تعیین گردید. عدد مدول جانبی برای نمونه‌های مذکور پایین و عموماً کوچکتر از ۲۵ می‌باشد.



شکل ۶- کارایی رابطه (۸) براساس داده‌های این تحقیق
($CR=0.890$, $R^2=0.22$, $N=37$)

۳-۳- روابط تجربی پیشنهادی

در این بخش از مطالعه روابط تجربی بین سرعت موج برشی نرمالیزه و عدد مدول نشست جانبی با استفاده از رگرسیون خطی، لگاریتمی، نمایی و نپرن^{۱۲} و براساس داده‌های این تحقیق و داده‌های (L'Heureux و همکاران، ۲۰۱۳) به کمک نرم‌افزار SPSS, 16 بررسی گردید. نتایج بررسی آماری این روابط در جدول (۳) ارائه شده است. در این روابط متغیر (V_s) سرعت موج برشی نرمالیزه می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روابط پیشنهادی مخصوصاً رابطه (۱۲) از نظر ضریب R^2 و خطای

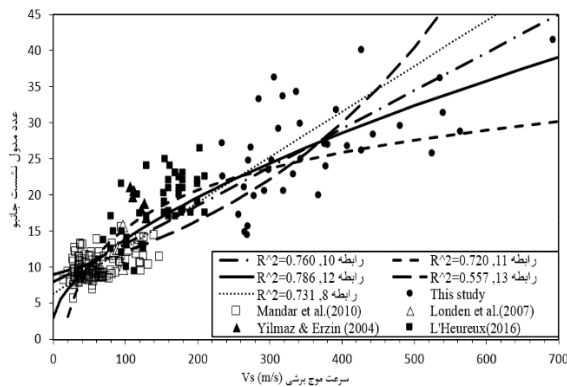
جدول ۳- نتایج آماری برای روابط پیشنهادی بر اساس کل داده‌ها ($N=۸۴$)

مرجع رابطه	رابطه	RMSE	R^2	CR
این مطالعه	۱۰ $m = 0.053 V_s + 7.948$	۰/۲۲۴۲	۰/۵۴۸	۱/۰۲۸
	۱۱ $m = 7.592 \ln(V_s) - 19.577$ >13.18 m/s for: (V)	۰/۲۰۹۲	۰/۵۵۷	۱/۰۵۴
	۱۲ $m = 0.639 V_s^{0.616} + 2.970$	۰/۲۰۴۸	۰/۶۰۰	۱/۰۲۷
	۱۳ $m = 9.02 e^{(0.003V_s)}$	۰/۳۳۴۶	۰/۴۹۴	۰/۹۶۱
L'Heureux و همکاران (۲۰۱۳)	۸ $m = 0.063 V_s + 6.36$	۰/۲۴۶۸	۰/۳۵۳	۰/۹۶۹

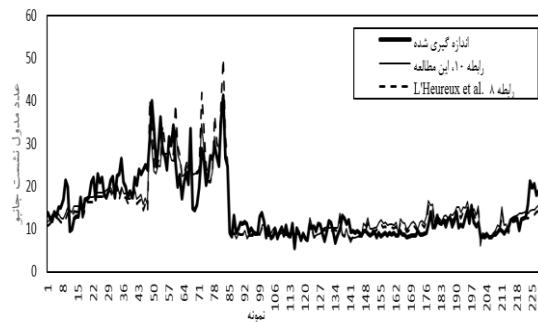
جدول ۴- نتایج آماری روابط پیشنهادی و رابطه موجود برای کل داده‌ها ($N=۲۲۹$)

مرجع داده‌ها	مرجع رابطه	ردیف	رابطه	RMSE	R^2	CR
این مطالعه	این مطالعه	۱۰	$m = 0.053 V_s + 7.948$	۰/۲۳۹۳	۰/۷۶۰	۰/۹۹۷
		۱۱	$m = 7.592 \ln(V_s) - 19.577$ For: ($V > 13.18 \text{ m/s}$)	۰/۲۵۵۹	۰/۷۲۰	۱/۰۰۰
		۱۲	$m = 0.639 V_s^{0.616} + 2.970$	۰/۲۳۴۷	۰/۷۷۶	۱/۰۳۹
		۱۳	$m = 9.02 e^{(0.003V_s)}$	۰/۳۲۷۵	۰/۵۵۷	۰/۹۶۲
L'Heureux (۲۰۱۶) Mandar و همکاران (۲۰۱۶) Londen و همکاران (۲۰۰۷) Erzlin و Yilmaz (۲۰۰۴)	L'Heureux و همکاران (۲۰۱۳)	۸	$m = 0.063 V_s + 6.36$	۰/۲۵۴۱	۰/۷۳۱	۰/۹۸۰

رابطه (۱۰) به صورت خطی همانند رابطه موجود (۸) و رابطه (۱۲) نمای می‌باشد. حداکثر ضریب (R^2) برای رابطه (۱۰) برابر ۰/۷۸۶ و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برابر ۰/۲۲۵۷ می‌باشد. لذا به عنوان بهترین رابطه پیشنهادی این مطالعه برای محدوده تغییرات سرعت موج برشی برابر با ($V_s = 14-694$ m/s) عدد مدول نشست جانبی ($m=40-8$) پیشنهاد می‌شود. مقایسه منحنی روابط پیشنهادی به همراه رابطه موجود برای کلیه داده‌های موجود در شکل (۹) و پیش‌بینی رابطه پیشنهادی (۱۰) در شکل (۱۰) ارائه شده است.



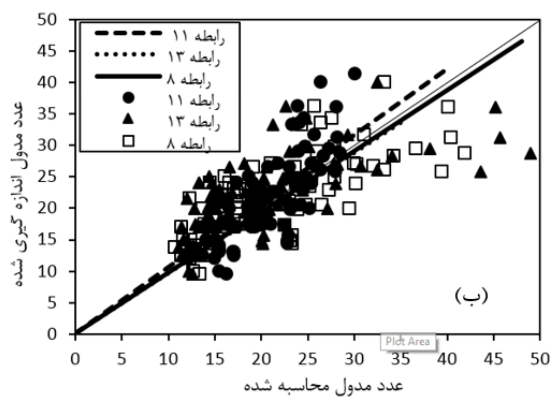
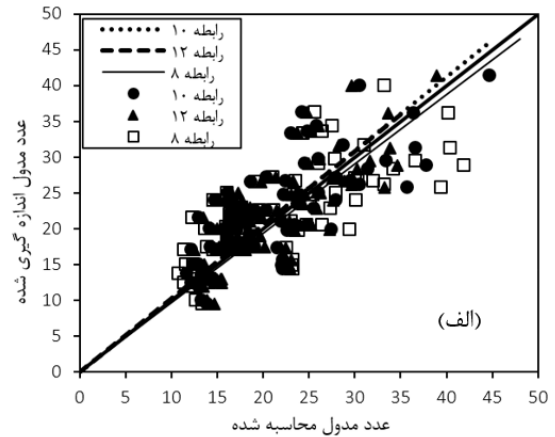
شکل ۹- مقایسه رابطه بین عدد مدول جانبی و سرعت موج برشی با کل داده‌ها ($N=229$)



شکل ۱۰- مقایسه پیش‌بینی بهترین رابطه پیشنهادی (رابطه (۱۰) و رابطه موجود (۸))

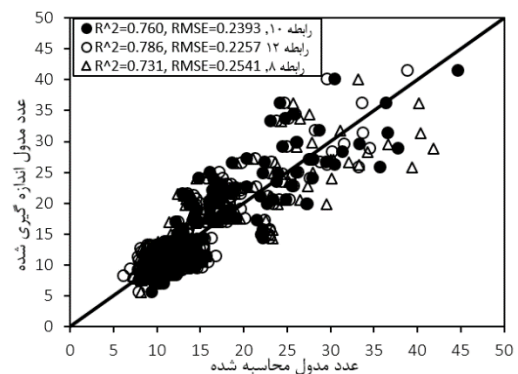
۴- تحلیل با مدل شبکه عصبی

در سال‌های اخیر از شبکه عصبی مصنوعی به طور گسترده برای تهیه مدل‌های پیش‌بینی خصوصیات مختلف خاک استفاده می‌شود. تحقیقاتی با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک به عنوان داده‌های ورودی شبکه عصبی مصنوعی برای ارزیابی مقدار ضرایب نشست تحکیم در تئوری ترزاقی و عمدتاً شاخص فشردگی، انجام گرفته است. در این خصوص به مطالعات Ozer و همکاران (۲۰۰۸) و Kalantary و Kordanij (۲۰۱۲) و Park (۲۰۱۱) بلوری و فرخنده (۱۳۸۹)؛ دریایی و همکاران (۱۳۸۹) و همچنین استفاده

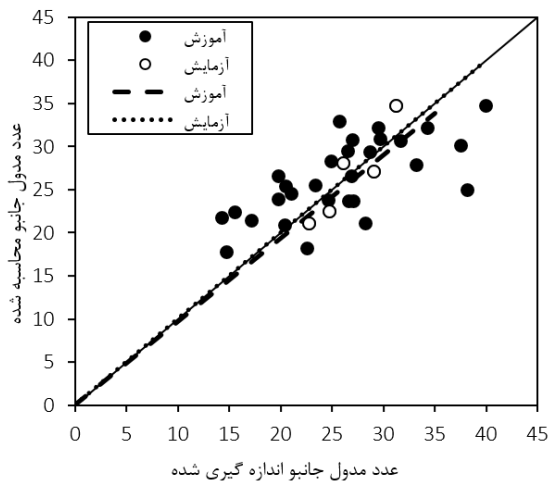


شکل ۷- کارایی روابط پیشنهادی ($N=84$)

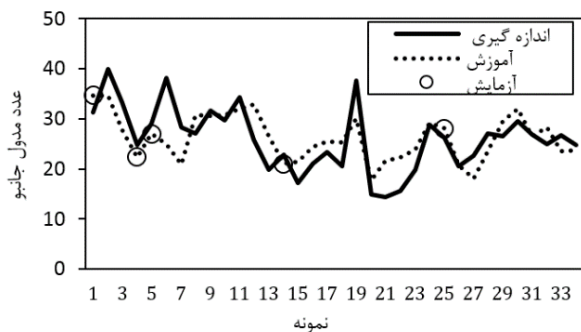
به منظور ارزیابی کلی روابط پیشنهادی و رابطه موجود، برای داده‌های تحقیق حاضر به همراه کلیه داده‌های موجود در ادبیات فنی شامل ۲۲۹ سری از داده‌های سرعت موج برشی و عدد مدول نشست جانبی، بررسی انجام شده و خلاصه نتایج آماری در جدول (۴) ارائه شده است. در محدوده تغییرات سرعت موج برشی (۱۴) الی ۶۹۴ متر بر ثانیه) روابط پیشنهادی (۱۰) و (۱۲) ضرایب آماری بهتری نسبت به رابطه (۸) دارند. کارایی این روابط در مقایسه با رابطه موجود برای کل داده‌های موجود در شکل (۸) ارائه شده است.



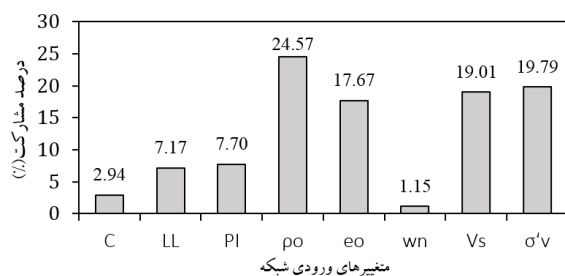
شکل ۸- کارایی بهترین روابط پیشنهادی این تحقیق (روابط (۱۰) و (۱۲)) در مقایسه با رابطه موجود برای کل داده‌ها ($N=229$)



شکل ۱۲- نمودار کارائی شبکه عصبی با دو لایه پنهان (N=۳۷)
آموزش $R^2=0/523$ تست $R^2=0/756$



شکل ۱۳- مقایسه پیش‌بینی شبکه عصبی با دو لایه پنهان



شکل ۱۴- درصد مشارکت داده‌های ورودی در تحلیل شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی عدد مدول جانبی

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به طور خلاصه از تحقیق بر روی خاک‌های رسی و ماری با پتانسیل نشست‌پذیری تحکیم در گستره شهر تبریز نتایج زیر به دست می‌آید:

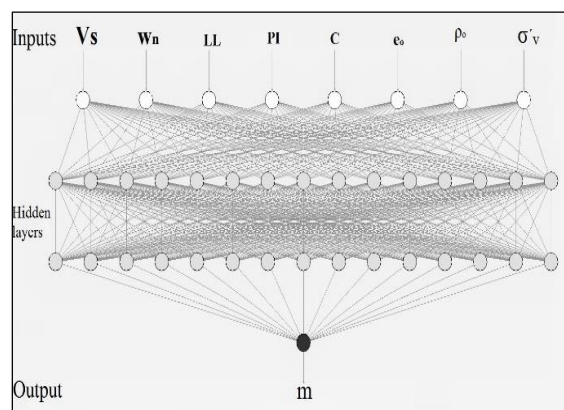
محدوده تغییرات عدد مدول نشست جانبی برای نمونه‌های خاک‌های رسی ماری شهر تبریز برابر (۴۱/۳۹-۱۴/۳۸) m و سرعت موج برشی نرمالیزه (Vs=۲۳۴-۶۹۴ m/s) می‌باشد. ضریب همبستگی اسپیرمن سرعت موج برشی نسبت به عدد مدول

از روش استنتاج فازی-عصبی انطباقی توسط هاشمی و همکاران (۱۳۹۶) می‌توان اشاره کرد.

در تحقیق حاضر سرعت موج برشی نرمالیزه به همراه سایر خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک و در مجموع ۸ متغیر به عنوان ورودی شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی عدد مدول نشست جانبی در نظر گرفته شده و کارائی این روش با نتایج روابط تجربی پیشنهادی نیز مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. از شبکه عصبی چند لایه با روش پیش رونده و الگوریتم پس انتشار با تابع انتقال سیگموئید به کمک نرم‌افزار Qnet 2000 استفاده گردید. در کلیه تحلیل‌ها، آموزش شبکه برای ۹۰ درصد داده‌ها صورت گرفته و تست شبکه به صورت راندم با ۱۰ درصد داده‌ها انجام شد. شبکه عصبی در حالت‌های یک لایه پنهان با تعداد نرون‌های مختلف ۵ الی ۲۰ نرون و شبکه با دو لایه پنهان با ترکیب تعداد نرون‌های مختلف ۱۰ الی ۲۰ نرون برای هر لایه مطالعه گردید.

شبکه با دو لایه پنهان با تعداد ۱۵ نرون در هر لایه با ضریب تبیین ($R^2 = 0/532$) و خطای ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 0/1254$) در مرحله آموزش و برای مرحله تست شبکه ($RMSE = 0/1030$ و $R^2 = 0/756$) نسبت به سایر حالت‌ها کارائی بهتری داشته است. ساختار این شبکه در شکل (۱۱) ارائه شده و در شکل (۱۲) نتایج پیش‌بینی آن نشان داده شده است. نمودار مقایسه پیش‌بینی عدد مدول جانبی در این حالت شبکه نیز در شکل (۱۳) ارائه شده است.

درصد نقش هر کدام از متغیرهای ورودی در تحلیل شبکه عصبی بررسی شده و نتایج مربوطه در شکل (۱۴) ارائه شده است. درصد نقش سرعت موج برشی (Vs) برابر ۱۹/۰۱ بوده که از سایر متغیرهای ورودی به غیر از تنش مؤثر قائم و دانسیته بزرگتر می‌باشد.



شکل ۱۱- ساختار شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی عدد جانبی

بوده و از روش شبکه عصبی نیز می‌توان برای مقایسه و صحت-سنجی نتایج بهره گرفت.

۷- مراجع

بلوری بزاز ج، فرخنده س، "برآورد نشست تحکیمی خاک‌های رسی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران، ۱۳۸۹.

دریائی م، کاشفی‌پور س م، احدیان ج، قبادیان ر، "مدل‌سازی شاخص فشردگی خاک‌های ریزدانه به کمک شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه با سایر روابط تجربی"، نشریه آب و خاک، ۲۴ (۴)، ۱۳۸۹، ۶۶۷-۶۵۹.

هاشمی جوکار م، میراثی س، رهنما ح "تعیین شاخص تراکم خاک‌های رسی با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی انطباقی"، مجله عمران مدرس، دوره هفدهم شماره ۴، ۱۳۹۶، ۲۷۷-۲۸۹.

Amiri SN, Esmaeily A, Mahouti A, "A Realistic Theory of Soils Consolidation.Geo-Frontiers", 2014, 3828-3837.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 2435-03, "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading", West Conshohocken, PA, USA. 2011.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 854. Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, West Conshohocken, PA, USA. 2014.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 422-63, "Standard test method for particle size analysis of soils", West Conshohocken, PA, USA. 2007.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 2216, "Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass", West Conshohocken, PA, USA. 1998.

American Society for Testing and Materials. ASTM D 4318-93, "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", West Conshohocken, PA, USA. 2004.

American Society for Testing and Materials ASTM D 2487-93. "Standard classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)", West Conshohocken, PA, USA. 2011.

American Society for Testing and Materials ASTM D7400-08, "Standard Test Methods for Down hole Seismic Testing", West Conshohocken, PA, USA. 2008.

Carrol RA, "Use of CRS test to predict settlement in an Irish silt", University College, Dublin, Ireland, 2007.

Fam M, Santamarina JC, "Study of Consolidation Using Mechanical and Electromagnetic Waves", Geotechnique, 1997, 47 (2), 203-249.

Fellenius BH, "Basics of Foundation Design", Electronic

نشست جانبو برابر (۰/۵۰۰) بوده که از سایر متغیرها به غیر از شاخص فشردگی بزرگتر می‌باشد.

رابطه تجربی L'Heureux و همکاران (۲۰۱۳) که بر اساس نتایج خاک‌های رسی نرم اشباع کشور نروژ (با سرعت موج برشی کوچک‌تر از ۲۰۰ متر بر ثانیه) به دست آمده، برای داده‌های این تحقیق ضرایب آماری $R^2=0/022$ و خطای $RMSE=0/247$ به دست می‌دهد. به منظور تعمیم این رابطه، روابط تجربی بین سرعت موج برشی نرمالیزه و عدد مدول جانبو در حالت‌های رگرسیون خطی، لگاریتمی، نمایی و نپرین با استفاده از نرم‌افزار (SPSS,16) مطالعه گردید. چهار رابطه پیشنهادی ((۱۰) تا (۱۳)) مخصوصاً رابطه (۱۲) نسبت به رابطه (۸) براساس داده‌های مختلف مربوط به نمونه‌هایی از کشورهای نروژ، هند، ترکیه و آمریکا و داده‌های این تحقیق (خاک‌های رسی شهر تبریز) و در مجموع ۲۲۹ سری داده، کارائی بهتری نتیجه داده است (نتایج برای رابطه (۱۲)، $R^2=0/786$ ، خطای $RMSE=0/2257$ و $CR=0/999$).

لذا روابط پیشنهادی به منظور برآورد عدد مدول جانبو برای خاکهای رسی با محدوده تغییرات ($m=5/59-41/39$) پیشنهاد می‌گردد. استفاده از این گونه روابط تجربی به دلیل سادگی و همچنین برآورد سرعت موج برشی در لایه با استفاده از روش‌های مختلفی ژئوفیزیکی که امروزه توسعه یافته‌اند، می‌تواند کاربردی باشند. این روابط مخصوصاً در مناطق وسیع که عملاً ارزیابی نشست تحکیم با صرف هزینه و زمان قابل توجهی انجام می‌شود، مفید خواهد بود و حتی برای مقاصد پهنه‌بندی از نظر پتانسیل نشست پذیری یک منطقه نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. در هر حال انجام قضاوت مهندسی و صحت‌سنجی این روابط در صورت کاربرد آنها برای خاک‌های سایر مناطق تأکید می‌شود.

شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی عدد مدول جانبو با متغیرهای ورودی ($\sigma'_v, c, w_n, e_0, LL, PI, \rho_v, V_s$) در حالت‌های یک و دولایه پنهان و با بررسی تعداد نرون‌های مخفی مختلف، با استفاده از داده‌های تحقیق حاضر ($N=37$) مطالعه گردید. درصد نقش سرعت موج برشی در شبکه عصبی از تمام متغیرها به غیر از دانسیته طبیعی و تنش مؤثر قائم بزرگتر می‌باشد. شبکه با دو لایه پنهان با تعداد ۱۵ نرون در هر لایه با ضریب تبیین ($R^2 = 0/523$) و خطای ریشه میانگین مربع ($R^2=0/1254$) برای مرحله آموزش و برای مرحله تست شبکه ($R^2=0/756$ و $RMSE=0/1030$) نسبت به سایر حالت‌ها کارائی بهتری داشته است. کارائی این روش تقریباً مانند روابط تجربی می‌باشد. در روش تحلیل شبکه عصبی مصنوعی نیاز به داده‌های بیشتری از خصوصیات فیزیکی، خمیری به همراه سرعت موج برشی می‌باشد. در هر حال به نظر می‌رسد در پیش‌بینی مقدار ضرایبی از جمله عدد مدول جانبو به دلیل وجود رگرسیون مناسب بین متغیرهای تحقیق و همچنین سادگی بیشتر، استفاده از روابط تجربی کاربردی تر از روش شبکه عصبی

- Park HI, "Evaluation of the compression index of soils using an artificial neural network", *Computers and Geotechnics* 38, 2011, 472-481.
- Tong L, Liu L, Cai G, Du G, "Assessing the coefficient of the earth pressure at rest from shear wave velocity and electrical resistivity measurements", *Engineering Geology*, 2013, 163, 122-131.
- Yang G, Luo Y, Zhang Y, Wang E, "Application of the tangent modulus method in nonlinear settlement analysis of sand foundation", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013.
- Yilmaz I, Erzincan Y, "On the reliability of SPT-N value as an indication of consistency of clayey soils", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Published Online, 2004.
- Yoon H, Lee C, Kim H, Lee JS, "Evaluation of preconsolidation stress by shear wave velocity", *Smart Structures and Systems*, 2011, 7 (4), 275-287.
- Edition, www.Fellenius.net, 2006, 275.
- Hooshmand A, Aminfar MH, Asghari E, Ahmadi H, "Mechanical and Physical Characterization of Tabriz Marls, Iran. *Geotechnical Geology Engineering*", 2012, 30, 219-232.
- Kalantary F, Kordnaji A, "Prediction of compression index using artificial neural network. Scientific", *Research and Essays*, 2012, 7 (31), 2835-2848.
- Knusen M, "On Determination of Gmax by Bender Element and Cross-Hole Testing", *Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering*, Master Thesis, 2014.
- Landon M M, DeGroot D J, Sheahan TC, "Nondestructive Sample Quality Assessment of a Soft Clay Using Shear Wave Velocity", *American Society of Civil Engineers, ISSN (online), Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 424-432.
- L'Heureux JS, "Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays", *Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical meeting Challenges in Nordic Geotechnics*, 2016, 299-308.
- L'Heureux JS, Long M, Vanneste M, Sauvin G, Hansen L, Polomf U, Lecomte I, Dehls J, Janbu N, "On the prediction of settlement from high-resolution shear-wave reflection seismic data: The Trondheim harbour case study, mid Norway", *Engineering Geology*, 2013, 167, 72-83.
- Likitlersuang S, Teachavorasinskun S, Surarak C, Oh E, Balasubramaniam A, "Small strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays", *Soils and Foundations*, 2013, 53 (4), 498-509.
- Long M, Donohue S, "Characterization of Norwegian marine clays with combined shear wave velocity and Piezocone cone penetration test (CPTU)", *Canadian Geotechnical Journal*, 2010, 47 (7), 709-718.
- Mandar PK, Patel A, Singh DN, "Application of Shear Wave Velocity for Characterizing Clays from Coastal Regions." *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2010, 14 (3), 307-321.
- Mayne PW, Rix GJ, "Gmax-qcrelationships for clays", *Geotechnical Testing Journal*, 1993, 16 (1), ASTM, 54-60.
- Nishimura S, "Laboratory Study on anisotropy of natural London Clay", *Department of Civil and Environmental Engineering Imperial College London, Doctor of Philosophy thesis*. 2005.
- Nor Omara M, Abbiss CP, Taha MR, Anuar K, Nayan M, "Prediction of long-term settlement on soft clay using shear wave velocity and damping characteristics", *Engineering Geology*, 2011, 123, 259-270.
- Noutash MK, Dabiri R, Hajjalilue Bonab M, "The Evaluation of Soil Liquefaction Potential Using Shear Wave Velocity Based on Empirical Relationships", *International Journal of Engineering*, 2012, 6 (4), 218-232.
- Ozer M, Isik NS, Orhan M, "Statistical and neural network assessment of the compression index of clay-bearing soils", *Bulletin of Engineering Geology and Environmental*, 2008, 67, 537-545.

EXTENDED ABSTRACT

Determination of the Janbu Modulus Number in Clayey Soils with using Shear Wave Velocity (Case Study: Tabriz City)

Alireza Alizadeh Majdi^a, Rouzbeh Dabiri^{b*}, Navid Ganjian^c, Abbas Ghalandarzadeh^d

^a Department of Geotechnical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^b Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

^c Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^d School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 28 April 2018; Accepted: 26 January 2019

Keywords:

Janbu modulus number, Shear wave velocity, Clay soils, Tabriz marl, Empirical relationships, Artificial neural network

1. Introduction

The most common methods for studying the consolidation settlement have required considerable time and cost. To assessing of the consolidation settlement, mostly used theories of Terzaghi and Janbu. Today, one of the topics of interest to researchers, evaluates the settlement by using of methods such as empirical relationships or an artificial neural network based on physical and plasticity properties and more recently the shear wave velocity. In this study, physical, plasticity and consolidation tests were performed on samples obtained from three boreholes that drilling in Tabriz city, located in the northwestern of Iran. Downhole test was also used to determine the shear wave velocity in the boreholes. By using nonlinear regression analysis, four empirical relations between the shear wave velocity and the Janbu modulus number were proposed. Also, in order to estimate the Janbu modulus number, the feed-forward artificial neural network with back-propagation algorithms, with 8 input variables including specific gravity, initial void ratio, moisture content, clay percentage, plasticity and liquid limit and effective stress along with shear wave velocity was studied.

2. Methodology

2.1. Experimental study

In this study, by drilling three machine boreholes at depths up to 8 meters, complete physical, plasticity and consolidation experiments were carried out on 20 undisturbed samples. The in-field Downhole test was also used to determine the shear wave velocity from each about one meter in the boreholes based on ASTM-D7400-08. As much as possible, the results of geotechnical studies in this study area were also used. Finally, a database of 37 complete soil characteristics and the shear wave velocity, were provided. The location of this study boreholes is shown in Fig. 1.

2.2. Regression analyses

The Janbu modulus number (m) was determined for each samples of boreholes (e.g. bh-3 in Fig. 2). Statistical description of variables included the specific gravity (G_s), percentage of clay particles (C), liquid limit (LL), plasticity index (PI), natural density (ρ), natural moisture content (w_n), compression index (C_c), the normalized shear wave velocity (V_s) and Janbu modulus number (m) were carried out. The Spearman

* Corresponding Author: Rouzbeh Dabiri

E-mail addresses: alimajdi@yahoo.com (Alireza Alizadeh Majdi), rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir (Rouzbeh Dabiri), n.ganjan@srbiau.ac.ir (Navid Ganjian) aghaland@ut.ac.ir (Abbas Ghalandarzadeh).

correlation coefficient between these variables and Janbu modulus number were performed by using SPSS (V.16.2007) software. Existing empirical relationship that presented by L'Heureux et al. (2013), was verified according to data base of this study. The empirical relationships between normalized shear wave velocity and Janbu modulus number were investigated with linear and nonlinear regression and four relationships were proposed. The proposed relationships were compared with existing equations based on the available data from other soils (Mandar et al, 2010; Yilmaz and Erzin, 2004; London et al., 2007; L'Heureux, 2016).

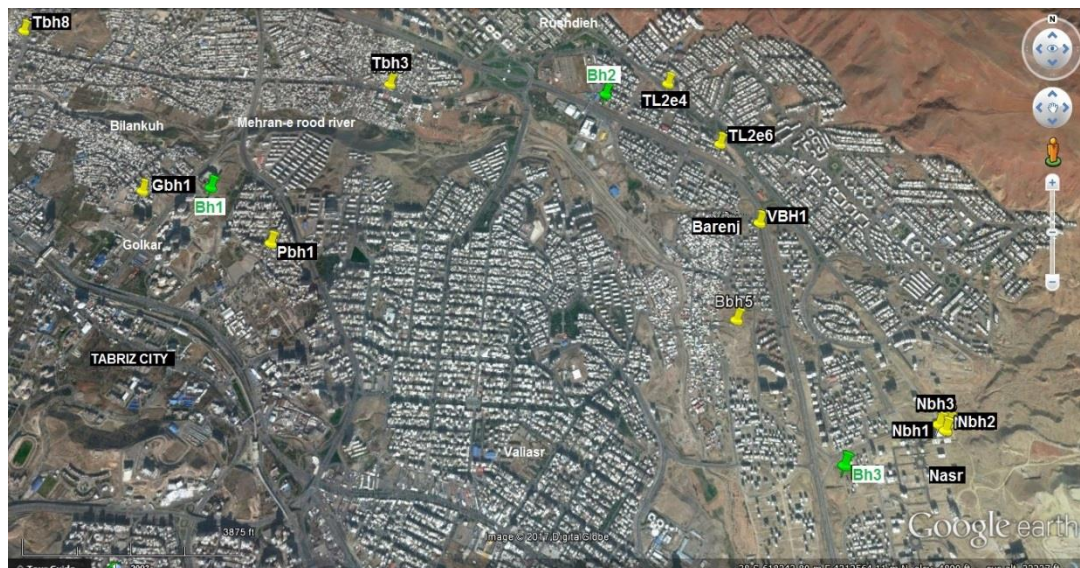


Fig. 1. Location of this study boreholes (www.Google.com/maps/2016)

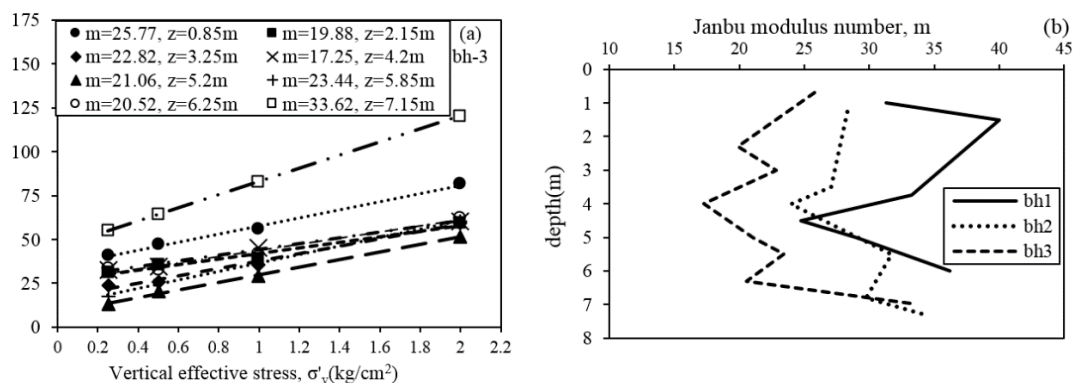


Fig. 2. a) Variation of Janbu tangent modulus in bh3 (Z: sample depth, m; Janbu modulus number), b) Variation Janbu modulus number in boreholes.

2.3. Artificial Neural Network (ANN)

Multi-layer Artificial Neural Network (ANN) was studied in order to predict the Janbu modulus number. ANN input variables included liquid limit, plastic index, clay particle size, initial void ratio, natural density, natural moisture content, shear wave velocity and effective vertical stress. In this study, the feed-forward neural network with back-propagation algorithms, with 8 input variables including specific gravity, initial void ratio, moisture content, clay percentage, plasticity and liquid limit and effective stress along with shear wave velocity was studied by Qnet 2000 software. In all analyses, training and testing of ANN were conducted with 90% and 10% of the database consequently.

3. Results and discussion

3.1. Proposed equations

The variation range of Janbu modulus number were (m=14.38-41.39) and the normalized shear wave velocity ($V_s = 234 \sim 694$ m/s) in this study. The Spearman correlation coefficient of the normalized shear wave velocity was +0.50, greater than other variables. The statistical coefficients of this study proposed equations in

comparison of existing equation were presented in Table 1. The results of Eq. (3) including, determination coefficient ($R^2 = 0.76$), root mean square error (RMSE = 0.2257) and the regression line slope (CR = 0.999) was the best.

Table 1. Statistical results for proposed equations based on total data base (N=229)

Database reference	Equation reference	NO	Equation	RMSE	R^2	CR
This study	This study	1	$m = 0.053 V_s + 7.948$	0.2393	0.760	0.997
L'Heureux (2016)		2	$m = 7.592 \ln(V_s) - 19.577$ for: ($V > 13.18$ m/s)	0.2559	0.720	1.000
Mandar et al. (2010)		3	$m = 0.639 V_s^{0.616} + 2.970$	0.2347	0.776	1.039
Londen et al. (2007)		4	$m = 9.02 e^{(0.003V_s)}$	0.3275	0.557	0.962
Yilmaz, Erzin (2004)		5	$m = 0.063 V_s + 6.36$	0.2541	0.731	0.980

3.2. Developed ANN

ANN with two hidden layers and 15 neurons per layer have better performance than other modes. The structure of this ANN is presented in Fig. 3. Statistical coefficient for this ANN were ($R^2 = 0.756$, RMSE = 0.1030). Contribution percent of shear wave velocity in ANN is about 20 (%).

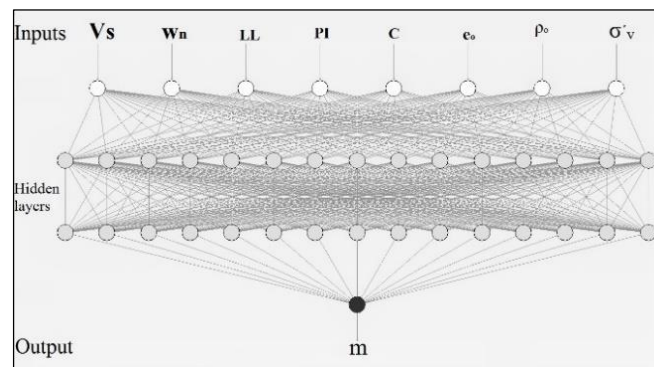


Fig. 3. Structure of the ANN model with two hidden layers to predict the Janbu modulus number (m)

4. Conclusions

Determining the Janbu module number by using the conventional method requires considerable time and cost and the effects of disturbance also occur in the results. To determine the number of Janbu modulus number, we can use the proposed experimental equations based on the shear wave velocity. These equations proposed for the variation range of Janbu modulus number ($m = 59.5 \sim 39.41$, $V_s = 14 \sim 694$ m / s). Also, we can use the ANN to estimate the Junbu modules number. The performance of the two methods described in estimating the Janbu modulus number was approximately the same. By using ANN in order to estimate the Janbu modules number, was needed more data including physical and plasticity characteristics with shear wave velocity.

5. References

- American Society for Testing and Materials, ASTM D7400-08, "Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing", West Conshohocken, PA, USA, 2008.
- Yang G, Luo Y, Zhang Y, Wang E, "Application of the tangent modulus method in nonlinear settlement analysis of sand foundation", Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.
- L'Heureux JS, "Correlations between shear wave velocity and geotechnical parameters in Norwegian clays", Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical meeting Challenges in Nordic Geotechnic, 2016, 299-308.
- L'Heureux JS, Long M, Vanneste M, Sauvin G, Hansen L, Polomf U, Lecomte I, Dehls J, Janbu N, "On the prediction of Settlement from high-resolution shear-wave reflection seismic data: The Trondheim harbor case study, mid Norway", Engineering Geology, 2013, 167, 72-83.
- Mandar PK, Patel A, Simgh DN, "Application of Shear Wave Velocity for Characterizing Clays from Coastal Regions", KSCE Journal of Civil Engineering, 2010, 14 (3), 307-321.
- Yilmaz I, Erzin Y, "On the reliability of SPT-N value as an indication of consistency of clayey soils", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2004, Published Online.