

## تخمین نتایج آزمایش SPT با استفاده از روش‌های احتمالاتی و شبکه عصبی در لایه‌های رسی (مطالعه موردی):

## لایه‌های رسی تبریز

علیرضا علیزاده مجدی

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

روزبه دبیری

گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۷

rouzbeh\_dabiri@iaut.ac.ir

## چکیده

در این مطالعه تخمین نتایج آزمایش نفوذ استاندارد به روش‌های احتمالاتی و نیز شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از خصوصیات خمیری و فیزیکی لایه‌های رسی و با مطالعه موردی خاک‌های رسی شهر تبریز انجام شده است. در این تحقیق دو گمانه ماشینی تحقیقاتی به عمق تا ۸ متری حفاری شده و آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های تهیه شده و نیز آزمایش صحرایی نفوذ استاندارد انجام گرفت. با استفاده از نتایج آزمایشات و داده‌های موجود، بانک اطلاعاتی مشتمل بر ۱۱۲ سری از خصوصیات لایه‌های رسی محدوده تحقیق تهیه گردید. به کمک روش تحلیل احتمالاتی سه سیگما محدوده‌های احتمالاتی برای هر کدام از متغیرهای تحقیق شامل فعالیت، درصد رطوبت، شاخص استحکام، درصد عبوری الک ۲۰۰ و دامنه خمیری به منظور تخمین نفوذ استاندارد تصحیح شده پیشنهاد گردید. بهترین رابطه مربوط به نفوذ استاندارد بر اساس شاخص استحکام با شیب همبستگی ۱۵/۱۰ می‌باشد. همچنین مناسب ترین نتیجه شبکه عصبی مصنوعی مربوط به دو لایه پنهان با تعداد ۱۰ و ۵ نرون مخفی به ترتیب با ضریب تعیین و خطای ریشه میانگین مربعات برابر ۰/۸۰۵ و ۰/۰۶۳ در مرحله تست ارزیابی گردید. نتایج روش شبکه عصبی نسبت به روش احتمالاتی به صورت آماری مقایسه گردیده و مناسب‌تر بوده است.

**کلمات کلیدی:** نفوذ استاندارد، لایه‌های رسی، تبریز، روش سه سیگما، شبکه عصبی

## مقدمه

آزمایش نفوذ استاندارد<sup>۱</sup> SPT یکی از آزمایشات معمول و کاربردی در مطالعات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی یک منطقه می‌باشد. در حال حاضر این آزمایش به طور گسترده در سراسر دنیا مورد توجه قرار دارد. آزمایش نفوذ استاندارد در سال ۱۹۲۷ ابداع شده است. این آزمایش برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ توسط استاندارد ASTM با کد ASTM-1586 تدوین گردید. انجام آزمایش نفوذ استاندارد، طبق استاندارد های انگلستان با کد (BS1377, 1975)، اروپا با کد (Euro code 7, 1997) ترکیه با کد (TSE5744, 1988) نیز ارائه شده است (Kayabashi, 2015). در ایران نیز دستورالعملی با شماره استاندارد ۲۲۴ در سال ۱۳۸۰ با عنوان "دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در مطالعات ژئوتکنیک" توسط دفتر استاندارد مهندسی آب وابسته به وزارت نیرو تدوین شده است. این آزمایش برای تعیین خصوصیات مقاومتی و نشست پذیری خاک‌های غیر چسبنده بکار رفته و در خاک‌های چسبند نیز اطلاعات ارزشمندی از این آزمایش بدست می‌آید (سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور نشریه ۲۲۴، ۱۳۸۰). آزمایش نفوذ استاندارد بر اساس استاندارد (ASTM-D1586, 2014) در داخل گمانه انجام می‌گردد. طبق این استاندارد، انجام آزمایش نفوذ استاندارد به انواع لایه‌های غیر سنگی<sup>۲</sup> و خاک‌های با قطر حداکثر کمتر از نصف قطر نمونه‌گیر دستگاه محدود می‌شود. به منظور همسان نمودن نتایج این آزمایش، ضرایب

اصلاحی با استفاده از روش اصلاح NCEER<sup>۳</sup>-97 تعیین می‌گردد (Hooshmand et al., 2012).

برای انجام آزمایش نفوذ استاندارد نیاز به حفاری گمانه ماشینی و استفاده از تجهیزات معین می‌باشد درحالی‌که خصوصیات فیزیکی و خمیری لایه‌ها در عمل براحتی قابل تعیین می‌باشند، لذا استفاده از این خصوصیات در تحلیل به منظور برآورد نتایج آزمایش نفوذ استاندارد کاربردی خواهد بود. روابط تجربی زیادی بین خصوصیات مختلف فیزیکی و خمیری، ضرایب نشست، پارامترهای مقاومتی خاک‌ها و حتی خصوصیات تورمی خاکها با نتایج آزمایش نفوذ استاندارد ارائه شده است. برای اولین بار ظرفیت باربری ماسه‌ها با استفاده از شمارش ضربات نفوذ استاندارد تعیین گردید (Terzaghi et al., 1945). محققان زیادی بر روی روابط تجربی بین نتایج نفوذ استاندارد و مدول برشی (Anbazhagam et al., 2012) و یا با سرعت موج برشی از قبیل: (Seed et al., 1981; Lee Shh, 1990; Chatterjee et al., 2013) تحقیق کرده‌اند. روابط تجربی زیادی برای ارتباط بین نتایج ضربات نفوذ استاندارد و سایر آزمایشات محلی وجود دارد که به عنوان نمونه به مطالعه درخصوص ارتباط بین نتایج نفوذ استاندارد و پرسیومتری می‌توان اشاره کرد (Kayabaşı, 2012). نفوذ استاندارد به طور گسترده در تحقیقات ژئوتکنیکی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. (Topsakal et al., 2014) در سال ۲۰۱۴ پایداری شیب را با استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد در داخل گمانه‌هایی دریک لغزش دوباره فعال شده مطالعه کردند (Topsakal et al., 2014). کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد برای سیستم اطلاعات جغرافیایی به منظور توسعه نقشه مرغوبیت

1-Standard Penetration Test  
2-Unlithified

مکانیکی و فیزیکی خاک رس حاصل از مارن تبریز مطالعاتی انجام دادند. در این تحقیق، خصوصیات مقاومتی، تغییر شکل و رفتار تنش-کرنش آنها با استفاده از آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی بررسی شده است. در (جدول ۱) و (۲) خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی و خمیری و نفوذ استاندارد انواع لایه‌های خاک رسی حاصل از مارن تبریز ارائه شده است. همچنین (رابطه ۱) برای برآورد نفوذ استاندارد بر اساس عمق نمونه‌ها در این خاک‌ها پیشنهاد گردید (Hooshmand et al., 2012).

$$N=1.2177 D+31.012 \quad \text{رابطه ۱:}$$

جدول ۱- خلاصه خصوصیات خاک‌های رسی حاصل از مارن تبریز (Hooshmand et al., 2012).

Type of marl	USCS classification	LL (%)	PI (%)	Moisture (%)	Void ratio	Specific weight (kg/cm <sup>3</sup> )	Expansive pressure (kg/cm <sup>3</sup> )
Yellow marl	CL-CH	55-75	30-35	25	0.75-0.95	1.7	1-2
Green marl	CL-CH	50-65	20-25	20	0.65-0.85	1.8	1-2
Gray/black marl	CL-CH, MH	40-60	15-20	15	0.5-0.7	1.9	0.5-1.5

جدول ۲- نتایج نفوذ استاندارد خاک‌های رسی حاصل از مارن تبریز (Hooshmand et al., 2012).

Type of marl	N <sub>SPT</sub>
Yellow marls	10-50
Green marls	40-60
Grey/black marls	40-80

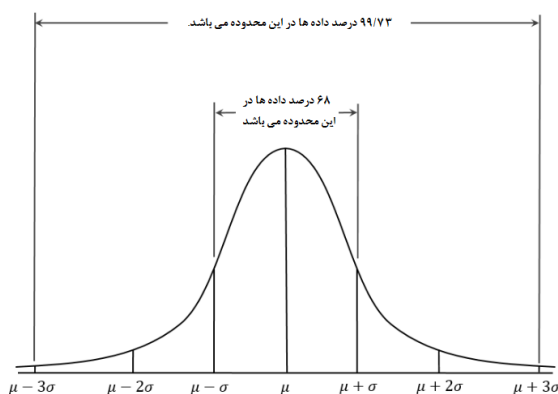
انحراف معیار نسبت به میانگین داده‌ها قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. محدوده یک برابر انحراف معیار نسبت به میانگین داده‌ها نیز در یک سوم فاصله از محدوده‌های حداکثر و حداقل داده‌ها با احتمال قرارگیری داده‌ها برابر با ۶۸ درصد قرار دارند. بنابراین اگر HCV بزرگترین مقدار ممکن و LCV کوچکترین مقدار ممکن داده‌ها باشد، این پارامترها تقریباً "برابر مقدار سه برابر انحراف معیار، بیشتر و کمتر نسبت به متوسط می‌باشند. لذا در صورتیکه مقدار این پارامترها با استفاده از تجربه، جداول و یا منحنی‌های تیپ برآورد شوند با استفاده از قانون سه سیگما، مقدار انحراف معیار بر اساس رابطه زیر برآورد می‌شود (Dabiri et al., 2011).

$$\sigma = \frac{HCV-LCV}{6} \quad \text{رابطه ۲:}$$

خاک نیز ارائه شده است (Stalin et al., 2014). در خصوص ارتباط بین نتایج نفوذ استاندارد به منظور ارزیابی پدیده روانگرایی تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است (Jafari et al., 2010). در مورد ارتباط بین نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده نیز تحقیقات متعددی انجام شده است (Kalantari et al., 2009). در سال ۲۰۱۵ توسط A. Kayabaş مطالعاتی در خصوص برآورد تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد بر اساس خصوصیات خاک‌های رسی شامل درصد قطر دانه‌ها، درصد رطوبت، حدود اتبرگ، فعالیت و درصد رس با استفاده از روش رگرسیون خطی و غیرخطی انجام گردید. در سال ۲۰۱۲ علی هوشمند و همکاران بر روی خصوصیات

در سال ۲۰۰۴ توسط Y. Yılmaz و همکاران تحقیقاتی بر روی رابطه بین خصوصیات مقاومت برشی و عدد نفوذ استاندارد در خاک‌های رسی انجام شده است. بر اساس نتایج این تحقیق مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌های رسی با طبقه‌بندی CH و CL همبستگی خوبی با نتایج آزمایش دارد (Yilmaz et al., 2004).

به منظور برآورد نتایج آزمایش نفوذ استاندارد از روش‌های مختلف تحلیلی از جمله روش تحلیل احتمالاتی سه سیگما بر اساس سایر خصوصیات فیزیکی و خمیری لایه‌ها می‌توان استفاده نمود. روش سه سیگما توسط Wang و Dai در سال (۱۹۹۲) برای بیشتر موضوعات مهندسی ژئوتکنیک تشریح شد. مطابق (شکل ۱)، در قانون سه سیگما از این واقعیت که ۹۹/۷۳ درصد تمام مقادیری که توزیع نرمال دارند، در زیر ۳ برابر



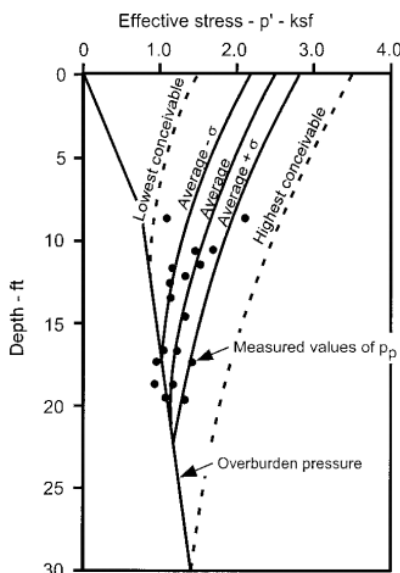
شکل ۱- احتمال وقوع بر اساس قانون سه سیگما (μ میانگین داده‌ها).

برای قضاوت در خصوص معقول بودن مقادیر براساس پایین‌ترین مقدار ممکن برابر با سه برابر انحراف معیار محاسبه شده کمتر از میانگین و معادل سه برابر

قانون سه سیگما زمانی که داده‌ها محدود و یا عدم قطعیت در دسترس باشد و یا حتی هیچ داده‌ای موجود نباشد، می‌تواند بکار رود. این روش همچنین

مقاومت برشی زهکشی نشده نسبت به عمق نمونه ها مطابق (شکل ۲) استفاده شده است (Duncan, 2000).

انحراف معیار بیشتر از میانگین می تواند بکار رود. بدین ترتیب مقادیر خارج از این محدوده به عنوان نتیجه اشتباه تلقی خواهد شد (Dabiri et al., 2011). از این روش به عنوان نمونه به منظور ارزیابی تغییرات فشار پیش تحکیم یا



شکل ۲- ترسیم تغییرات فشار پیش تحکیم با استفاده از تحلیل احتمالاتی سه سیگما (Duncan, 2000).

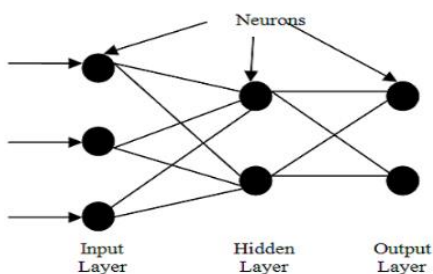
وارد شبکه می شود. (شکل ۳) لایه های یک شبکه عصبی چندلایه را نشان می دهد. لایه های میانی لایه های مخفی بوده و آخرین لایه، جواب های خروجی از مدل را فراهم می نماید. خروجی هر نرون توسط رابطه زیر تعریف می شود:

$$a = f\left(\sum_{i=1}^n (p_i w_{j,i} + b_j)\right) \quad \text{رابطه ۳:}$$

که در این رابطه ضریب وزنی ارتباط بین نرون  $i$ ام لایه با نرون  $j$ ام لایه قبل می باشد. با عنوان بایاس برای نرون  $i$ ام و  $p_i$  مقدار نرون  $i$ ام لایه قبل و مقدار  $a$  خروجی برای مقدار نرون  $j$ ام و  $f$  تابع انتقال نرون  $j$ ام می باشد. توابع زیادی در انتقال نتایج از لایه قبل به لایه بعد مورد استفاده قرار می گیرد. انتقال بین صفر تا یک عمل می کند. تابع سیگموئید به صورت رابطه زیر بیشترین کاربرد را در موضوعات مهندسی دارد.

با استفاده از این روش، ضریب اطمینان در موضوعات مختلف مهندسی از جمله لغزش دیوار حائل و پایداری شیروانی نیز مطالعه شده است (Duncan, 2000). دبیری و همکاران در سال ۱۳۹۰ از این روش برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی مخلوط ماسه با درصد های مختلف سیلت براساس سرعت موج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها استفاده نمودند (Dabiri et al., 2011).

در سال های اخیر از شبکه عصبی مصنوعی نیز به طور گسترده برای تهیه مدل های پیش بینی خصوصیات مختلف لایه های خاک و حتی سنگ از قبیل مطالعات (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۵) استفاده می شود. شبکه های عصبی نوع بازگشتی پردازش اطلاعات در عناصری به نام نرون ها می باشند. به گروه هایی از این نرون ها لایه گفته می شود. یک شبکه شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی می باشد. اطلاعات از طریق گره های لایه ورودی



شکل ۳- توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی (Venkatech, 2011).

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

رابطه ۴:

شن، درصد ماسه، M درصد سیلت، C درصد ذرات رسی، x, y, z مختصات نمونه گیری، D، عمق نمونه، w<sub>n</sub> درصد رطوبت طبیعی،  $\sigma'_v$  تنش موثر قائم، fs و qc مقاومت های مربوط به آزمایش نفوذ مخروط، FGP درصد عبوری از الک ۰.۲۰۰، Su، مقاومت برشی زهکشی نشده، ۵۰D قطر معادل با ۵۰ درصد قطر دانه های خاک، Vs سرعت موج برشی و ۶۰N نفوذ استاندارد تصحیح شده می باشد.

در تحلیل شبکه های عصبی مصنوعی غالباً تحلیل مدل در دو مرحله آموزش و تست شبکه انجام می شود. روش های مختلفی در تحلیل شبکه استفاده می شود که در موضوعات مهندسی روش پیش رونده و الگوریتم پس انتشار بیشتر استفاده می شود (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۵). در (جدول ۳) خلاصه ای از آخرین مطالعات در خصوص کاربرد شبکه های عصبی توسط محققان مختلف ارائه شده است (Tuskan et al., 2016; Venkatech, 2011; Bahadori et al., 2011; Tarawneh, 2017). در این جدول G درصد

جدول ۳- خلاصه سوابق اخیر در کاربرد شبکه عصبی برای ارزیابی نتایج آزمایش نفوذ استاندارد.

مرجع	داده	متغیرهای ورودی	متغیر خروجی	لایه های پنهان			مرحله آموزش		مرحله تست	
				اول	دوم	سوم	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
Venkatesh(2011)	۹۴	G,S,M,C,D	N <sub>60</sub>	۵	۷	-	-	-	-	-
et al.(2016)Tuskan	۱۲۱	G,S,M,C,D,x, y, z	N <sub>60</sub>	۸	۸	-	۰/۹۷۴	۰/۰۴	۰/۹۳۵	۰/۰۸
Kalantary et al.(2009)	۸۰	PI,w <sub>n</sub> , $\sigma'_v$ ,N <sub>60</sub>	S <sub>u</sub> (kpa)	۶	۳	۲	-	۷/۸	-	۸/۸
Tarawneh(2017)	۱۰۹	q <sub>c</sub> , f <sub>s</sub> , $\sigma'_v$	N <sub>60</sub>	۶	-	-	-	-	۰/۹۵	-
Bahadori et al.(2016)	۱۹۱	N <sub>60</sub> , $\sigma'_v$ ,PI,D <sub>50</sub> ,FGP	Vs(m/s)	-	-	-	۰/۹۵	۱۶/۲۷	۰/۹۰	۳۷/۲۷

شکل دهی زمین شناسی محدوده تحقیق نقش مؤثری داشته اند. در محدوده تحقیق انواع لایه های رسی سیلتی و تناوبی از خاک های رسی حاصل از مارن- های سبز و زرد و خاکستری گچ دار متعلق به دوره میوسن وجود دارد. این لایه ها به عنوان بستر منطقه بوده و رسوبات درشت دانه جوانتر مربوط به دوران کواترنری بر روی آنها قرار گرفته است. این لایه ها عمدتاً در شمال و شمال شرقی و بخشی در جنوب شهر رخنمون دارند.

تحقیقات حاضر در دو بخش میدانی و تحلیلی برنامه ریزی شده است. در روش میدانی دو گمانه ماشینی به روش دورانی به قطر تا ۴ اینچ حفاری گردیده و آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی انجام گردیده است. همچنین از نتایج مطالعات ژئوتکنیک پروژه های موجود نیز تا حد امکان استفاده گردید. در مجموع از نتایج آزمایشات مربوط به دو گمانه حفر شده و ۱۵ گمانه موجود در منطقه استفاده شده است. لاگ گمانه های حفر شده در این تحقیق در شکل (شماره ۵) نشان داده شده است.

### آزمایشات انجام یافته

از حفاری دو گمانه به عمق حدود ۸ متر، ۱۴ نمونه دست نخورده تهیه شدند. خصوصیات فیزیکی شامل دانه بندی طبق استاندارد - ASTM D422، دانسیته و درصد رطوبت نمونه ها طبق استاندارد ASTM D2216 و حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 تعیین گردید. همچنین آزمایش نفوذ استاندارد طبق استاندارد ASTM 1586-11 از هر عمق حدود یک متری انجام گردید. تصویری از حفره ایجاد شده در اثر انجام این آزمایش در نمونه (در شکل ۶-الف) نشان داده شده است. (شکل ۶-ب) استقرار دستگاه حفاری در محل گمانه (B1) واقع در محدوده خاک های رسی زرد رنگ (کوی کلکار) را نشان می دهد.

در این تحقیق ضمن ارزیابی و استفاده از نتایج تحقیقات و داده های موجود منطقه مورد مطالعه، دو گمانه تحقیقاتی به صورت ماشینی نیز در منطقه حفاری گردید. آزمایش نفوذ استاندارد در گمانه ها انجام شده و خصوصیات فیزیکی و خمیری نمونه های تهیه شده نیز در آزمایشگاه تعیین گردید. با تهیه بانک اطلاعاتی از خاک منطقه، برآورد مناسبتری برای نفوذ استاندارد تصحیح شده با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی ارائه و پیشنهاد گردیده است. همچنین در تحقیق حاضر به منظور پیش بینی نفوذ استاندارد از روش تحلیل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک به عنوان داده های ورودی شبکه بهره گرفته شده است. نتایج برآورد نفوذ استاندارد با استفاده از روشهای تحلیلی و شبکه عصبی با استفاده از ضرایب آماری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

### روش تحقیق

#### معرفی محدوده تحقیق

شهر تبریز واقع در شمال غرب ایران دارای انواع لایه های رسی و سیلتی می باشد. بررسی خصوصیات این لایه ها از نظر طراحی پی حائز اهمیت بوده و در صورت عدم توجه کافی به رفتار این لایه ها می تواند مشکلات جدی به بار بیاورد. به عنوان نمونه تصاویری از مشکلات بوجود آمده در سازه های احداث شده بر روی این لایه ها در شهر تبریز در (شکل ۴) ارائه شده است. مطالعات قابل توجه بر روی این لایه ها در شهر تبریز در (Hooshmand et al., 2012; Sadrekarimi et al., 2006, 2009; صدر کریمی و همکاران، ۱۳۸۵) انجام شده است. ژئومورفولوژی منطقه تحقیق حاصل تأثیر نیروهای تکتونیکی، فعالیت گسل ها، چین ها و فرسایش می باشد. فرسایش و رسوب گذاری به وسیله رودخانه ها نیز از عوامل مهمی هستند که در



شکل ۴- نمونه‌هایی از مشکلات سازه‌های احداث شده بر روی لایه‌های رسی در شهر تبریز: الف) ناپایداری شیب نگین پارک ولیعصر (Sadrekarimi et al., 2006) ب) انحراف سازه‌ها در اثر نشست، کوی باغمیشه.

گمانه BH1												
محل گمانه: کوی گلکار تبریز												
عمق گمانه: 6m												
تراز آب زیرزمینی: -												
DEPTH (m)	IDENTIFICATION	CLASS	ATTERBURG LIMITS			MOISTURE %	DENSITY			SPT		
			DESCRIPTION	SOIL TYPE	LL %		PL %	PI %	BULK		DRY	e <sub>o</sub>
									gr/cm <sup>3</sup>		gr/cm <sup>3</sup>	
1	خاک سطحی	خاک سطحی										
2	رس زرد کم‌رنگ	CL	39 40	21 23	18 17	22.49 23.42	1.99 2.08	1.62 1.69	0.597 0.564	30		
3	رس زرد متناوب به قهوه ای	CH	55	26	29	24.98	2.01	1.61	0.646	31		
4			53	29	24	30.26	1.86	1.43	0.866	34		
5			50	26	24	27.94	1.95	1.52	0.728	35		
6	رس سبز تیره	CL	49	26	23	26.68	1.96	1.55	0.711	36		
										45		

گمانه BH2												
محل گمانه: کوی نصر تبریز												
عمق گمانه: 8m												
تراز آب زیرزمینی: -												
DEPTH (m)	IDENTIFICATION	CLASS	ATTERBURG LIMITS			MOISTURE %	DENSITY			SPT		
			DESCRIPTION	SOIL TYPE	LL %		PL %	PI %	BULK		DRY	e <sub>o</sub>
									gr/cm <sup>3</sup>		gr/cm <sup>3</sup>	
1	خاک سطحی	خاک سطحی										
2	رس زرد	ML	39	30	9	24.74	1.93	1.55	0.705	24		
3			38	28	10	24.74	1.93	1.55	0.724	26		
4			39	29	10	24.84	1.86	1.49	0.797	27		
5	رس زرد رنگ متناوب به قهوه ای	MH	66	42	24	34.26	1.85	1.38	1.02	31		
6			65	36	29	36.95	1.84	1.34	1.05	33		
7	رس قهوه ای تیره رنگ	MH	56	27	29	31.47	1.89	1.44	0.937	34		
8			52	29	23	27.94	1.93	1.51	0.874	34		
			74	40	34	31.47	1.99	1.51	0.841	38		

شکل ۵- لاگ گمانه‌های حفاری شده در این تحقیق.

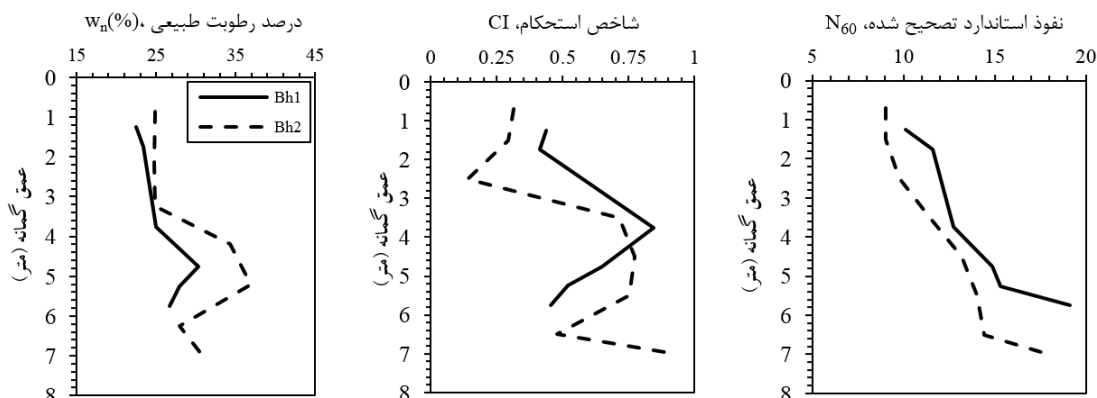


شکل ۶- الف) حفره آزمایش SPT در داخل مغزه رسی (عمق ۲ متری گمانه B<sub>2</sub>) ب) دستگاه حفاری در محل گمانه B<sub>1</sub>.

### تفسیر نتایج تحقیق

در مجموع ۱۱۲ سری از نتایج آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی بر روی ۱۴ نمونه از دو گمانه حفاری شده به همراه ۹۸ سری از نتایج آزمایشات مطالعات موجود در منطقه، مورد جمع بندی و استفاده قرار گرفت. ۵ متغیر بر اساس خصوصیات لایه‌های رسی شامل درصد ذرات ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ FGP، دامنه خمیری PI، شاخص استحکام CI، فعالیت A و درصد رطوبت طبیعی w<sub>n</sub> و همچنین N<sub>60</sub> به عنوان نتایج آزمایش نفوذ استاندارد

در گمانه‌ها که بر اساس روش NCEER,97 تصحیح شده‌اند، در نظر گرفته شد. در نمودارهای (شکل ۷)، تغییرات متغیرهای w<sub>n</sub>, CI, N<sub>60</sub> نسبت به عمق در دو گمانه تحقیقی ترسیم شده است. توصیف آماری کل ۱۱۲ داده تحقیق توسط نرم افزار (SPSS,16) طبق (جدول ۳) تعیین گردید. با توجه به مقدار پایین شاخص استحکام، حالت نمونه‌های ماخوذه عموماً "در محدوده خمیری قرار دارند.



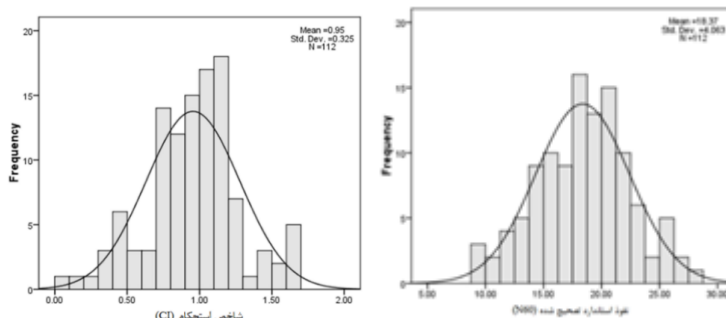
شکل ۷- نمودار تغییرات متغیرهای مهم تحقیق نسبت به عمق گمانه های حفر شده.

جدول ۴- توصیف آماری متغیرهای تحقیق (n=112).

متغیر	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل
درصد کل عبوری الک ۲۰۰	۹/۰۵۰	۸۰/۶۸	۱۰۰/۰	۶۳/۰
دامنه خمیری (%)	۶/۷۸۰	۲۵/۹۸	۴۵/۰	۶/۰
شاخص استحکام	۰/۳۲۵	۰/۹۵۵	۱/۶۹	۰/۰۲
فعالیت	۰/۱۳۶	۰/۵۴	۰/۹۶	۰/۲۰
درصد رطوبت طبیعی	۵/۵۵۰	۲۶/۵۹	۳۷/۹۴	۱۶/۳۰
نفوذ استاندارد تصحیح شده	۴/۰۶۳	۱۸/۳۷	۲۸/۰	۹/۰

شاخص استحکام با محدوده تغییرات (۰/۰۲~۱/۶۹) و عدد نفوذ استاندارد N<sub>60</sub> با محدوده تغییرات (۹~۲۸) در مقایسه با منحنی توزیع نرمال در (شکل ۸) ارائه شده است. با توجه به خصوصیات خمیری داده‌های تحقیق، نمونه‌های خاک رسی شهر تبریز براساس طبقه بندی (USCS) در رده های CL, CH, ML, MH قرار دارند.

توزیع فراوانی داده‌های تحقیق برای انواع نمونه‌های لایه‌های رسی شهر تبریز شامل انواع خاک‌های رسی زرد، زیتونی و خاکستری رنگ دارای پراکندگی مناسب می‌باشد. به‌عنوان نمونه هیستوگرام توزیع فراوانی


 شکل ۸- هیستوگرام توزیع فراوانی شاخص استحکام و عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده  $N_{60}$ 

### تحلیل احتمالاتی

همبستگی بین متغیرهای تحقیق شامل ۵ متغیر (PI, FGP, CI, A,  $w_n$ ) نسبت به عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده ( $N_{60}$ ) با استفاده از نرم افزار SPSS, 16 به روش رتبه‌بندی اسپیرمن تعیین گردید. نتیجه بررسی طبق (جدول ۵) ارائه شده است. مقدار ضریب +۱ و -۱ به معنی برترتیب همبستگی کامل مثبت و منفی بین دو متغیر می‌باشد. بیشترین ضریب همبستگی اسپیرمن مثبت پارامترها نسبت به عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده، به ترتیب مربوط به شاخص استحکام (۰/۷۵۲) و فعالیت خاک (۰/۶۱۴) می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش مقادیر هر یک از این متغیرها، افزایش قابل توجه در مقدار عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده انتظار می‌رود. بیشترین همبستگی منفی نیز به ترتیب مربوط به درصد رطوبت (۰/۷۱۵-) و درصد ذرات عبوری از الک ۲۰۰ (۰/۴۹۲-) می‌باشد. به عبارت دیگر و همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش درصد رطوبت و یا درصد ذرات ریزدانه عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده کاهش می‌یابد. ترکیب اصلی شیمیایی خاک‌های رسی تبریز به طور کلی شامل ۳۵ درصد کلسیت، ۴۰ درصد کوارتز، ۱۰ درصد فلدسپار و ۴ درصد دولومیت می‌باشد (Sadkarimi et al., 2006). با توجه به ترکیب کانی ها، همبستگی مطالعه شده در تحقیق حاضر بین خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک و نتایج نفوذ استاندارد به عنوان معیاری برای بیان میزان فشردگی و مقاومت خاک‌ها با نتایج مطالعات (Sadkarimi et al., 2006) در خصوص بررسی همبستگی بین متغیرهای فیزیکی و خمیری با خصوصیات فشردگی از قبیل شاخص

فشردگی (CC) و یا مقاومت برشی از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک مطابقت دارد.

با استفاده از تحلیل رگرسیون غیر خطی نرم افزار SPSS, 16 بهترین همبستگی بین عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده با متغیرهای انتخابی از خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک شامل دامنه خمیری، درصد ریزدانه، فعالیت، شاخص استحکام و درصد رطوبت طبیعی مطالعه شده و روابط طبق (جدول ۶) در نظر گرفته شد.

طبق قاعده سه سیگما حداکثر و حداقل مقدار عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده با توجه به نتایج تفسیر آماری داده‌ها (جدول ۴) به ترتیب برابر ۲۸ و ۹ می‌باشد لذا انحراف معیار بر اساس (رابطه ۲) برابر ۳,۱۶۷ بدست می‌آید. انحراف معیار آماری نیز طبق (جدول ۴) برابر ۴/۰۶۳ بوده و از مقدار انحراف معیار حاصل از روش سه سیگما بیشتر می‌باشد. با توجه به میانگین نفوذ استاندارد تصحیح شده برابر ۱۸/۳۷، ضریب تغییرات با روش‌های سه سیگما و آماری به ترتیب برابر ۱۷/۲۴ و ۲۲/۱۲ درصد بدست می‌آید و با محدوده پیشنهادی بر اساس تحقیقات Harr (۱۹۸۴) و Kulhawy (۱۹۹۲) بین ۱۵ الی ۴۵ درصد به عنوان تخمین اولیه مطابقت دارد. در هر حال روش سه سیگما ضریب تغییرات کمتری نتیجه می‌دهد که این نتیجه نیز با نتایج مطالعات قبلی انجام یافته در خصوص ارزیابی ضریب تغییرات برای شاخص فشردگی خاک با روش‌های سه سیگما و اندازه‌گیری به ترتیب برابر با ۸ و ۱۸ درصد تطابق دارد (Duncan, 1999).

جدول ۵- ضریب همبستگی اسپیرمن برای داده‌های تحقیق.

	FGP	PI	CI	A	$w_n$	$N_{60}$
FGP	۱/۰۰۰	۰/۰۹۷	-۰/۳۰۰	-۰/۳۷۹	۰/۶۳۵	-۰/۴۹۲
PI	۰/۰۹۷	۱/۰۰۰	۰/۶۹۶	۰/۵۹۶	-۰/۰۳۱	۰/۳۷۶
CI	-۰/۳۰۰	۰/۶۹۶	۱/۰۰۰	۰/۷۳۴	-۰/۶۶۰	۰/۷۵۲
A	-۰/۳۷۹	۰/۵۹۶	۰/۷۳۴	۱/۰۰۰	-۰/۴۵۰	۰/۶۱۴
$w_n$	۰/۶۳۵	-۰/۰۳۱	-۰/۶۶۰	-۰/۴۵۰	۱/۰۰۰	-۰/۷۱۵
$N_{60}$	-۰/۴۹۲	۰/۳۷۶	۰/۷۵۲	۰/۶۱۴	-۰/۷۱۵	۱/۰۰۰

جدول ۶- روابط همبستگی خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک با عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده.

ردیف	رابطه
۱	$N_{60} = 10/159 \ln(A) + 24/982$
۲	$N_{60} = -0/505 w_n + 31/805$
۳	$N_{60} = -0/229 FGP + 36/823$
۴	$N_{60} = 10/7259 e^{0/5234 CI}$
۵	$N_{60} = 0/094 PI^2 + 0/239 PI + 10/823$

با در نظر گرفتن روابط (جدول ۶) و انحراف معیار ۳/۱۶۷ (طبق رابطه ۲)، منحنی احتمالاتی سه برابر انحراف معیار بزرگتر و کوچکتر از میانگین (یعنی:  $\sigma \pm 3$  mean) مربوط به احتمالات ۹۹ و ۱ درصد ( $P=1$  و  $P=99$ ) برای هر چهار رابطه (جدول ۶) ترسیم گردید. این محدوده برای کلیه متغیرها شامل خصوصیات فیزیکی و خمیری تعیین گردیده و نتیجه در (شکل‌های ۹) ارائه شده است. مشاهده می‌شود اینک هیچکدام از داده‌های تحقیق در خارج این محدوده قرار نمی‌گیرند لذا از این نظر در بین داده‌های تحقیق حاضر نتیجه اشتباه وجود ندارد. در این نمودارها منحنی‌های احتمالاتی با مقدار انحراف معیار کوچکتر و بزرگتر از میانگین نیز ترسیم شده است که مربوط به احتمالات ۶۸~۳۲=P خواهد بود. همچنین به منظور مقایسه نتایج، روابط پیشنهادی (Kayabasi, 2015) مربوط به درصد رطوبت، فعالیت، درصد ریزدانه و شاخص استحکام نیز در این نمودارها ترسیم شده است. با توجه به منحنی‌های احتمالاتی رسم شده می‌توان گفت روابط Kayabasi بر اساس درصد رطوبت و شاخص استحکام در محدوده احتمالاتی ۵۰~۳۲=P برای داده‌های این تحقیق قرار دارد. رابطه Kayabasi بر اساس فعالیت خاک در محدوده ۵۰~۳۲=P بوده و رابطه بر اساس درصد ریزدانه در محدوده ۳۰=P می‌باشد. رابطه پیشنهادی این تحقیق با استفاده از دامنه خمیری برای برآورد اعداد نفوذ استاندارد تصحیح شده واقع در محدوده ۲۵~۱۰=N<sub>60</sub> در محدوده احتمالاتی ۸۰~۱۶=P قرار می‌گیرد. این برآورد برای روابط پیشنهادی بر اساس فعالیت، درصد رطوبت طبیعی و شاخص استحکام در محدوده احتمالاتی ۸۰~۳۲=P می‌باشد. نتیجه مربوط به رابطه بر اساس درصد ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ قابل محدوده‌بندی نبوده و به طور کلی رابطه پیشنهادی برای محدوده تغییرات عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده واقع در ۲۸~۹=N<sub>60</sub> در محدوده احتمالاتی ۹۹~۱=P قرار می‌گیرد.

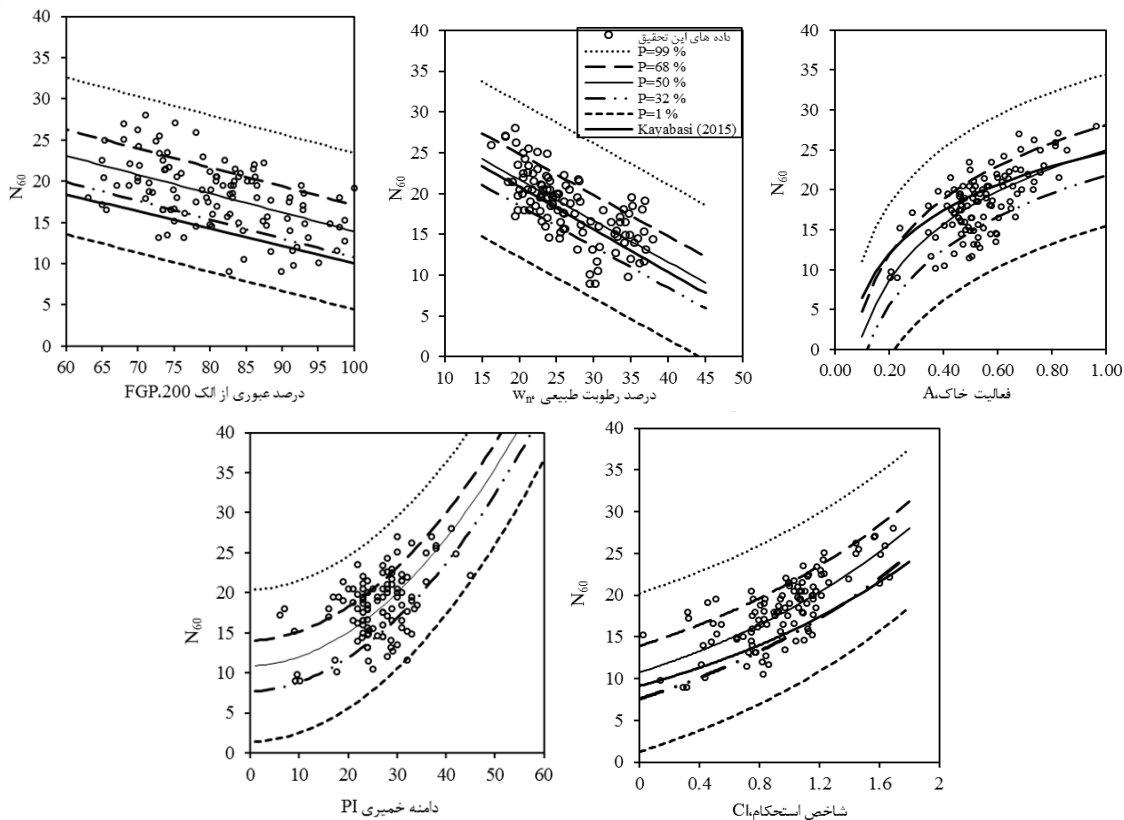
### شبکه عصبی مصنوعی

روش تحلیل شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی مقدار نفوذ استاندارد تصحیح شده بر اساس خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک مطالعه گردید. با توجه به امکان استفاده از داده‌های حداکثری موجود در روش تحلیل شبکه عصبی، از کلیه خصوصیات خاک تا حد امکان شامل درصد ذرات ریزدانه (FGP)، درصد ذرات رسی (C)، حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، دامنه خمیری (PI)، شاخص استحکام (CI) درصد رطوبت طبیعی (w<sub>n</sub>)، وزن واحد حجم خشک (γ<sub>d</sub>) و تخلخل اولیه (e<sub>0</sub>)، فعالیت (A) و تنش موثر قائم (σ'<sub>v</sub>) به عنوان ۱۱ متغیر ورودی شبکه عصبی و ۱۱۲ سری از داده‌ها، نفوذ استاندارد تصحیح شده (N<sub>60</sub>) برآورد گردید به منظور بررسی شبکه عصبی از نرم افزار Qnet2000 با روش پیش رونده و الگوریتم پس انتشار استفاده گردید. نقش هر کدام از متغیرهای ورودی در شبکه مورد بررسی قرار گرفت. کارایی این روش با نتایج مطالعات سایر محققان و همچنین روش تحلیل احتمالاتی انجام یافته، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. شبکه عصبی در حالت‌های یک لایه پنهان با تعداد نرون‌های پنهان مختلف ۵ الی ۲۰ و همچنین با دولایه پنهان با ترکیب تعداد نرون‌های مختلف ۵ الی ۱۵ نرون برای هر لایه انجام گردید. در کلیه تحلیلها، آموزش شبکه برای حدود ۸۰ درصد داده‌ها یعنی ۸۷ سری از داده‌ها صورت گرفته و با حدود ۲۰ درصد داده‌ها شامل ۲۵ سری از مجموع ۱۱۲ سری کل داده‌ها با انتخاب به صورت تصادفی توسط نرم افزار، تست شبکه انجام شد. رابطه بین نرون‌های دولایه متوالی طبق (رابطه ۳) و تابع انتقال طبق (رابطه ۴) از نوع سیگموئید انتخاب گردید. ساختار شبکه با دو لایه پنهان در (شکل ۱۰) ارائه شده است.

ضرایب آماری شامل ریشه میانگین مربع خطا<sup>۴</sup> و ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) برای نتایج پیش‌بینی شبکه عصبی در حالت‌های مختلف لایه پنهان و تعداد نرون‌های پنهان طبق (جدول ۷) ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد شبکه با یک لایه پنهان و با ۱۵ نرون و شبکه با دولایه پنهان با تعداد ۱۰ و ۵ نرون به ترتیب برای لایه اول و لایه دوم از نظر ضرایب آماری کارایی بهتری داشته‌اند. شبکه با دولایه پنهان به طور کلی در هر دو مرحله آموزش و تست ضرایب آماری بهتری نتیجه می‌دهد. با توجه به تعداد داده‌ها (n=۱۱۲) و نوع متغیرهای ورودی، ضرایب آماری در مقایسه با نتایج سوابق قبلی (جدول ۳) تطابق دارد. در تحلیل شبکه عصبی نقش<sup>۵</sup> هر کدام از متغیرهای ورودی شبکه در پیش‌بینی نفوذ استاندارد تصحیح شده (N<sub>60</sub>) در هر دو حالت یک و دو لایه پنهان مطالعه شده و نتیجه بهترین حالت شبکه‌ها با کمترین خطا طبق (شکل ۱۱) ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود این نقش برای تنش موثر قائم، درصد رطوبت طبیعی، درصد ذرات ریزدانه و فعالیت بیشترین بوده و برای درصد ذرات رسی، حد خمیری و وزن مخصوص خشک کمترین نقش بدست آمده است. همچنین بررسی آماری شامل شیب خط همبستگی (cr) و ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) بین نتایج بهترین حالت شبکه عصبی پیشنهادی (دولایه پنهان با ۱۰ و ۵ نرون پنهان)، نتایج تحلیل احتمالاتی (۵۰~۳۲=P) و نتایج روابط پیشنهادی (Kayabashi, 2015) با نتایج اندازه‌گیری شده برای نفوذ استاندارد تصحیح شده انجام گردید. خلاصه نتایج در (جدول ۸) ارائه شده است. طبق این نتایج پیش‌بینی‌های انجام گرفته توسط مدل شبکه عصبی با شیب همبستگی نزدیک به یک و ضریب (R<sup>2</sup>) بزرگتر از ۰/۸۰ نسبت به نتایج تحلیل احتمالاتی و روابط Kayabashi (2015) کارایی بهتری دارد. دلیل این موضوع به روش شبکه عصبی که مبتنی بر امکان استفاده از حداکثر داده‌های موجود شامل ۱۱ متغیر ورودی از خصوصیات مختلف فیزیکی و خمیری خاک مربوط خواهد بود در حالی که در روش‌های دیگر از یک متغیر برای برآورد استفاده شده است. تحلیل احتمالاتی (۵۰~۳۲=P) نیز از نظر ضرایب آماری شیب همبستگی و ضریب تعیین نسبت به روابط پیشنهادی (Kayabashi, 2015) نتایج بهتری داشته است. در هر دو روش بهترین نتیجه مربوط به همبستگی نفوذ استاندارد تصحیح شده با شاخص استحکام بوده و ضعیف‌ترین نتیجه به تحلیل براساس درصد ذرات ریزدانه (FGP) مربوط می‌باشد. در بین این روابط، رابطه همبستگی بین درصد رطوبت طبیعی و نفوذ استاندارد تصحیح شده می‌تواند جالب و کاربردی تر باشد چراکه معمولاً اندازه‌گیری درصد رطوبت طبیعی از نظر عملی براحتی ممکن بوده و می‌توان براساس تعیین درصد رطوبت طبیعی حتی با استفاده از نمونه‌های دست خورده در لایه‌های رسی عدد نفوذ استاندارد را برآورد نمود. در هر حال به نظر می‌رسد در پیش‌بینی متغیرهایی مانند نفوذ استاندارد تصحیح شده، همچنان استفاده از روابط تجربی و احتمالاتی بدلیل استفاده از متغیرهای کمتر در مقایسه با روش شبکه عصبی که نیاز به داده‌های بیشتری دارد، کاربردی‌تر می‌باشد. از روش شبکه عصبی برای مقایسه و صحت‌سنجی نتایج می‌توان بهره گرفت. کارایی روش‌های احتمالاتی و شبکه عصبی (حالت دو لایه پنهان) و روابط (Kayabashi, 2015) در نمودارهای (شکل ۱۲) ارائه شده است و نتایج تشریح شده بخوبی در این نمودارها قابل مشاهده می‌باشد. کل داده‌های مورد استفاده در هر دو روش ۱۱۲ سری از خصوصیات خاک‌های رسی شهر تبریز می‌باشد.

4-Root mean square error  
5- Determination coefficient  
6-Contribution

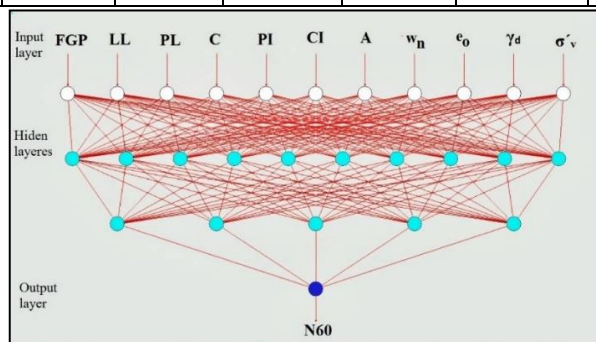




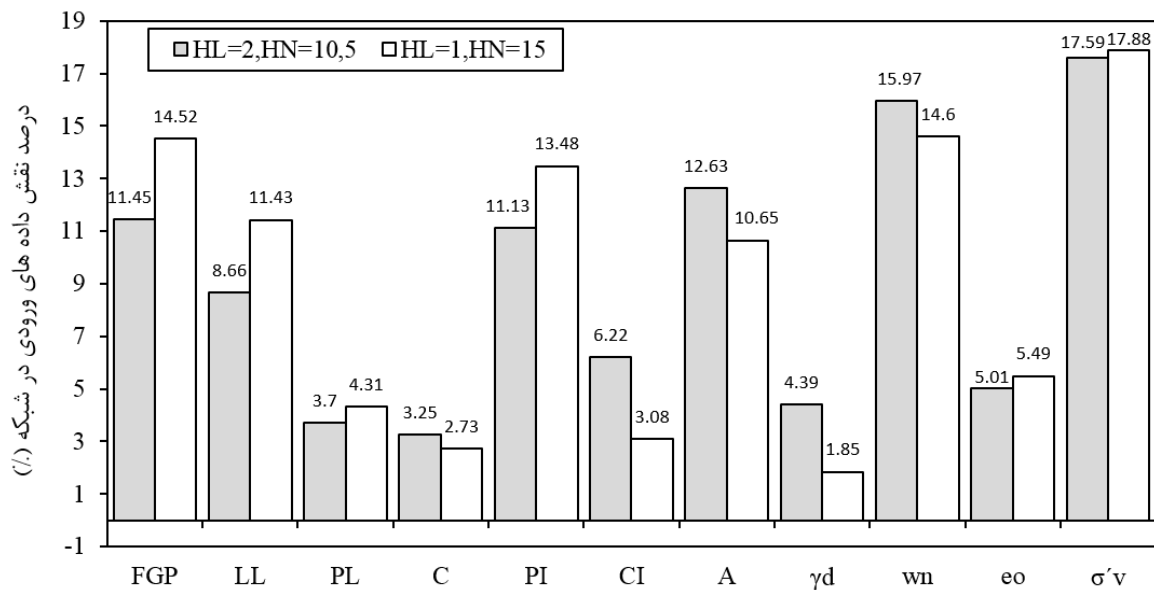
شکل ۹- منحنی های احتمالاتی برآورد نفوذ استاندارد تصحیح شده بر اساس خصوصیات فیزیکی و خمیری لایه های رسی تبریز.

جدول ۷- خلاصه نتایج تحلیل شبکه عصبی برای پیش بینی نفوذ استاندارد تصحیح شده با داده های تحقیق (112=PI).

لایه های مخفی	لایه های مخفی		مرحله آموزش		مرحله تست	
	لایه اول	لایه دوم	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>
۱	۵	-	۰/۰۵۵	۰/۸۵۲	۰/۰۹۲	۰/۶۸۹
	۱۰	-	۰/۰۶۵	۰/۸۱۴	۰/۰۶۳	۰/۸۰۵
	۱۵	-	۰/۰۶۳	۰/۸۲۳	۰/۰۶۲	۰/۸۰۸
	۲۰	-	۰/۰۶۸	۰/۷۹۴	۰/۰۶۳	۰/۸۰۵
۲	۵	۵	۰/۰۶۲	۰/۸۲۸	۰/۰۶۴	۰/۷۹۴
	۱۰	۵	۰/۰۶۱	۰/۸۳۹	۰/۰۶۳	۰/۸۰۵
	۱۰	۱۰	۰/۰۶۰	۰/۸۳۸	۰/۰۶۳	۰/۷۹۹
	۱۰	۱۵	۰/۰۶۴	۰/۸۱۹	۰/۰۶۴	۰/۷۹۷
	۱۵	۱۵	۰/۰۶۸	۰/۷۹۲	۰/۰۶۳	۰/۷۹۹



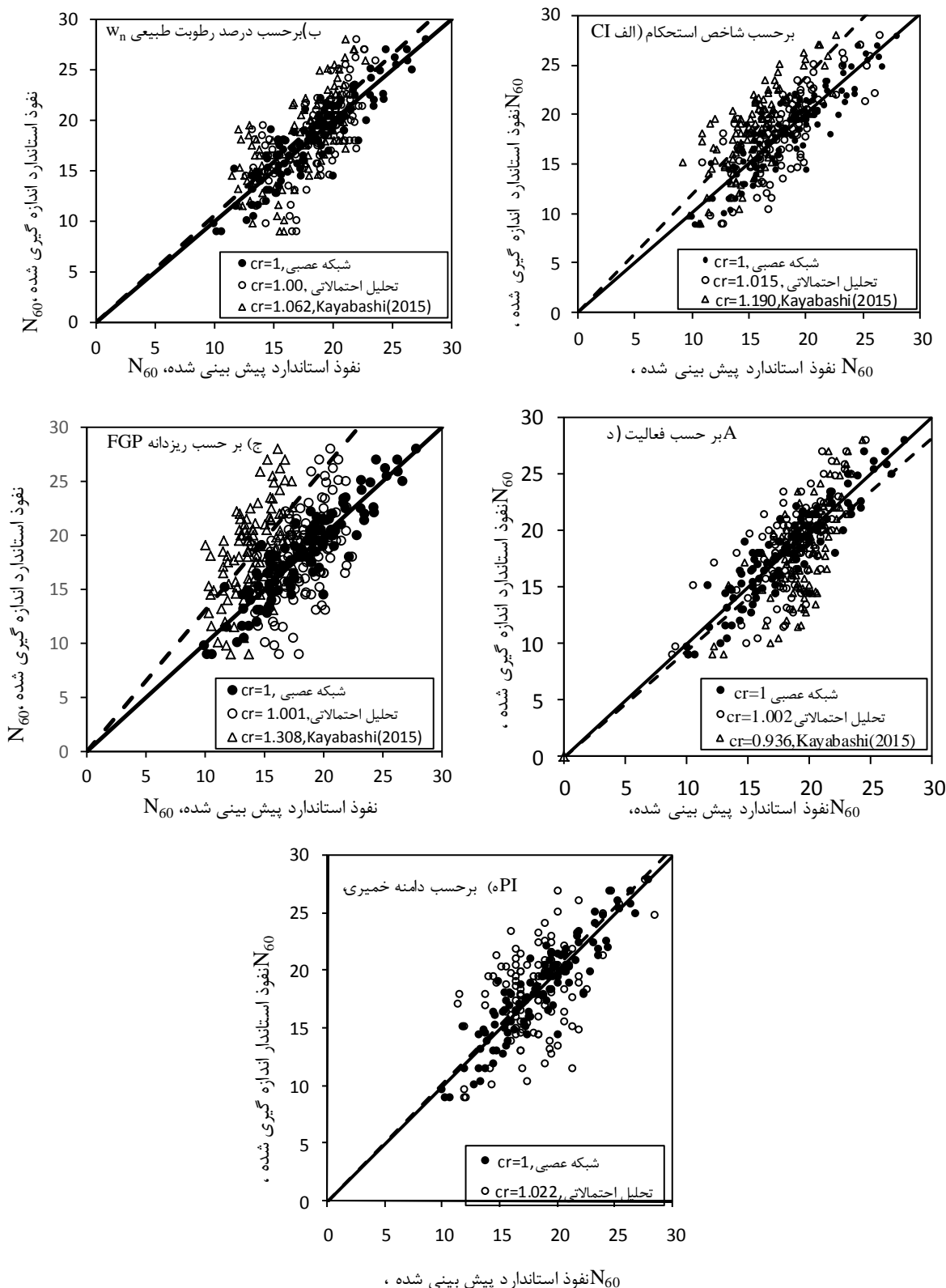
شکل ۱۰- ساختار شبکه عصبی با دو لایه پنهان به منظور پیش بینی نفوذ استاندارد تصحیح شده N60.



شکل ۱۱- هیستوگرام درصد نقش داده های ورودی در تحلیل شبکه عصبی. HN=Hidden neuron, HL=Hidden layer

جدول ۸- مقایسه نتایج روش احتمالاتی و شبکه عصبی برای داده های تحقیق (n=۱۱۲).

ردیف	رابطه	R <sup>2</sup>	CR	
روش رگرسیون غیر خطی Kayabashi(2015)	$N_{60} = 9/1166 e^{0.537CI}$	0.580	1/190	
	$N_{60} = -0.52 w_n + 31/2$	0.473	1/062	
	$N_{60} = 7/92 \ln(A) + 24/7$	0.433	0/936	
	$N_{60} = -0.21 FGP + 31/02$	0.350	1/308	
روش احتمالاتی (P=۵۰٪) (این مطالعه)	$N_{60} = 0.09 PI^2 + 0.239 PI + 10/833$	0.500	1/022	
	$N_{60} = 10/736 e^{0.5326CI}$	0.582	1/015	
	$N_{60} = -0.505 w_n + 31/805$	0.476	1/000	
	$N_{60} = 10/159 \ln(A) + 24/982$	0.465	1/002	
	$N_{60} = -0.229 FGP + 36/823$	0.400	1/001	
روش شبکه عصبی (این مطالعه)	دو لایه پنهان با ۵ و ۱۰ نرون مخفی	مرحله آموزش	0/839	0/998
		مرحله تست	0/805	0/908



شکل ۱۲- کارایی روش های مختلف برای پیش بینی نفوذ استاندارد تصحیح شده براساس خصوصیات فیزیکی و خمیری لایه های رسی ( $n=112$ ).

### نتیجه گیری

این تحقیق بر روی ۱۱۲ سری از نتایج مربوط به خصوصیات خاک‌های رسی حاصل از مارن واقع در شهر تبریز شامل انواع طبق طبقه‌بندی USCS انجام گردید. نمونه‌ها شامل CH, MH, CL, ML

انواع خاک‌های رسی زرد و زیتونی رنگ با دامنه خمیری پایین تا قابل توجه در محدوده تغییرات (۴۵~۶٪) و حد روانی در محدوده (۲۶~۷۷٪) می باشند. محدوده تغییرات نفوذ استاندارد تصحیح شده  $(N_{60})$  برابر (۲۸~۹) بدست آمده و نشانگر فشردگی متوسط تا متراکم نمونه‌ها می باشد.

احتمالاتی ۳۲ الی ۶۸ درصد می باشد. نتیجه مربوط به رابطه بر اساس درصد ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰ قابل محدوده بندی نبوده و به طور کلی رابطه پیشنهادی برای محدوده تغییرات عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده واقع در  $N_{60}=9\sim 28$  در محدوده احتمالاتی ۱ الی ۹۹ درصد قرار می گیرد.

از تحلیل شبکه عصبی مصنوعی با ۱۱ متغیر ورودی از خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک به منظور برآورد نفوذ استاندارد تصحیح شده، شبکه با یک لایه پنهان و با ۱۵ نرون مخفی و شبکه با دولایه پنهان با تعداد ۱۰ و ۵ نرون مخفی به ترتیب برای لایه اول و لایه دوم کارایی بهتری دارند و شبکه با دو لایه پنهان به ترتیب با ضریب تعیین و خطای ریشه میانگین مربعات برابر با ۰/۸۳۹ و ۰/۰۶۱ در مرحله آموزش و ۰/۸۰۵ و ۰/۰۶۳ در مرحله تست شبکه بهترین نتیجه دارد.

ضرایب آماری نتایج شبکه عصبی از نتایج روش احتمالاتی ۵۰ درصد مناسبتر می باشد و روش احتمالاتی نیز از روابط تجربی پیشنهادی (Kayabashi, 2015) کارایی بهتری دارد. بهترین رابطه مربوط به همبستگی نفوذ استاندارد با شاخص استحکام با ضریب تعیین و شیب همبستگی به ترتیب ۰/۵۸۲ و ۱/۰۱۵ می باشد. رابطه همبستگی بین درصد رطوبت طبیعی و نفوذ استاندارد تصحیح شده نیز بدلیل سهولت تعیین درصد رطوبت طبیعی و برآورد نفوذ استاندارد تصحیح شده با استفاده از آن می تواند جالب و کاربردی تر باشد

در هر حال در برآورد نفوذ استاندارد تصحیح شده، استفاده از روابط تجربی و احتمالاتی بدلیل استفاده از متغیرهای کمتر در مقایسه با روش شبکه عصبی که نیاز به داده های بیشتری دارد، کاربردی تر می باشد. از روش شبکه عصبی نیز برای مقایسه و صحت سنجی نتایج می توان بهره گرفت.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می دانند از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز برای حمایت های مالی صورت گرفته از طرح تحقیقاتی داخلی با عنوان (برآورد نتایج آزمایش مقاومت نفوذ استاندارد با کاربرد خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک های رسی به روش احتمالاتی با مطالعه موردی: خاک های چسبنده مارنی تبریز) کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

بیشترین همبستگی مثبت با روش رتبه بندی اسپیرمن بین عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده با شاخص استحکام (۰/۷۵۲) و فعالیت خاک (۰/۶۱۴) می باشد. به عبارت دیگر با افزایش مقادیر هر یک از این متغیرها، افزایش قابل توجه در مقدار عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده انتظار می رود. بیشترین همبستگی منفی نیز به ترتیب مربوط به درصد رطوبت (۰/۷۱۵-) و درصد ذرات عبوری از الک ۲۰۰ (۰/۴۹۲-) می باشد. یعنی همانگونه که انتظار می رود با افزایش درصد رطوبت و یا درصد ذرات ریزدانه عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده کاهش می یابد.

طبق روش سه سیگما، انحراف معیار برای نفوذ استاندارد تصحیح شده برابر ۳/۱۶۷ بدست می آید. انحراف معیار آماری نیز طبق (جدول ۵) برابر ۴/۰۶۳ می باشد. با توجه به میانگین نفوذ استاندارد تصحیح شده برابر ۱۸/۳۷، ضریب تغییرات با روش سه سیگما و آماری به ترتیب برابر ۱۷/۲۴ و ۲۲/۱۲ درصد بدست می آید که در محدوده پیشنهادی (Harr, 1992) و (Kulhawy, 1984) قرار دارد. در هر حال روش سه سیگما ضریب تغییرات کمتری نتیجه می دهد. این نتیجه با نتایج مطالعات (Duncan, 2000) در مورد ارزیابی انحراف معیار با روش سه سیگما برای شاخص فشردگی خاک نیز تطابق دارد.

محدوده حداقل و حداکثر برای خصوصیات فیزیکی و خمیری شامل دامنه خمیری، شاخص استحکام، درصد رطوبت، درصد ریزدانه و فعالیت خاک باروش سه سیگما (یعنی:  $\text{mean} \pm 3\sigma$ ) مربوط به احتمالات ۹۹ و ۱ درصد ترسیم گردیده و هیچکدام از داده های تحقیق در خارج این محدوده قرار نمی گیرند لذا از این نظر در بین داده های تحقیق حاضر نتیجه اشتباه وجود ندارد.

روابط Kayabasi بر اساس درصد رطوبت و شاخص استحکام در محدوده احتمالاتی ۳۲ الی ۵۰ درصد برای داده های این تحقیق قرار دارد. رابطه Kayabasi بر اساس فعالیت خاک در محدوده ۵۰ الی ۶۸ درصد بوده و رابطه بر اساس درصد ریزدانه در محدوده احتمالاتی ۳۰٪ می باشد. رابطه پیشنهادی این تحقیق با استفاده از دامنه خمیری برای برآورد اعداد نفوذ استاندارد تصحیح شده واقع در محدوده  $N_{60}=10\sim 25$  در محدوده احتمالاتی ۱۶ الی ۸۰ درصد قرار می گیرد. این برآورد برای روابط پیشنهادی بر اساس فعالیت، درصد رطوبت طبیعی و شاخص استحکام در محدوده

### منابع

- اسماعیلی، م.، پسندی، م.، هاشمی اصفهانیان، م.، ۱۳۹۵، تخمین مدول الاستیسته سنگ بکر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیر خطی، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۱، ص ۱۰-۲۸.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۰، نشریه ۲۲۴ دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد در مطالعات ژئوتکنیک.
- صدر کریمی ج، ذکری ا، ۱۳۸۵، رفتار خزشی خاکهای ریزدانه بر اساس مدل های ویسکو الاستیک، مجله مهندسی عمران، دانشکده فنی، جلد ۳۳ شماره ۳.
- Akca N, 2003, Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates, Eng. Geol. 67:219-231.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 422-63. 2007, Standard test method for particle size analysis of soils. West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 2216.1998, Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D 4318-93. 2004, Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils, West Conshohocken, PA, USA.
- American Society for Testing and Materials, D1586-112014, Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils, West Conshohocken, PA, USA.
- Anbazhagan P., Parihar A., Rashmi H.N., 2012, Review of correlations between SPT and shear modulus: A new correlation applicable to any region, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 36 52-69.
- Bahadori H., Momeni M.S., 2016, ANN for Correlation Between Shear Wave Velocity of Soil and Some Geotechnical Parameters, Int. J. Optim. Civil Eng., 6(3):455-467.

- Chatterjee K, Deepankar C, 2013, Variations in shear wave velocity and soil site class in Kolkata city using regression and sensitivity analysis, *Nat Hazards* 69:2057–2082. doi:10.1007/s11069-013-0795-7.
- Dabiri R., Askari F., Shafiei A., Jafari M. K., 2011, Shear Wave Velocity-Based Liquefaction Resistance of Sand-Silt Mixtures: Deterministic Versus Probabilistic Approach, *IJST, Transactions of Civil Engineering*, Vol. 35, No. C2, pp 199-215.
- Duncan M. J., Honorary Member, ASCE, 1999, Factors of Safety in Reliability In Geotechnical Engineering, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 4.
- Erzin Y., Tuskan Y., 2016, Prediction of Standard Penetration Test (SPT) Value in Izmir, Turkey using General Regression Neural Network, *International Conference on Agricultural, Civil and Environmental Engineering (ACEE-16)* April 18-19.
- Hooshmand A., Aminfar M. H., Asghari E., Ahmadi H., 2012, Mechanical and Physical Characterization of Tabriz Marls, Iran, *Geotechnical Geology Engineering*, Vol. 30, pp 219-232.
- Jafarian Y., Sadeghi Abdollahi A., Vakili R., Baziar M. H., 2010, Probabilistic correlation between laboratory and field liquefaction potentials using relative state parameter index ( $\zeta_R$ ), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30, 1061–1072.
- Kalantary F., Ardalan H., Nariman-Zadeh N., 2009, An investigation on the  $S_u-N_{SPT}$  correlation using GMDH type neural networks and genetic algorithms, *Engineering Geology* 104, 144–155.
- Kayabaşı, A., 2015, Some empirical equations for predicting standard penetration test blow counts in clayey soils: a case study in Mersin, Turkey, *Arab J Geosci* 8:7643–7654, DOI 10.1007/s12517-014-1694.
- Kayabaşı A., 2012, Prediction of pressuremeter modulus and limit pressure of clayey soils by simple and nonlinear multiple regression techniques: a case study from Mersin, Turkey, *Environ Earth Sci* 66:2171–2183. doi:10.1007/s 12665-011-1439-4.
- Lee SHH, 1990, Regression models of shear wave velocities. *J Chin Inst. Eng.* 13:519–532.
- Sadrkarimi J., Akbarzad M., 2009, Comparative Study of Methods of Determination of Coefficient of Subgrade Reaction, *EJGE*.
- SADREKARIMI J., ZEKRI A., MAJIDPOUR H., 2006, Geotechnical features of Tabriz Marl, *IAEG2006 Paper number* 335.
- Schanid F., 2005, Geo-Characterisation and Property of Natural Soils by in Situ Tests. *XVI ICSMGE, Osaka, Millpress* Vol. 1.
- Seed HB, Idriss IM, 1981, Evaluation of liquefaction potentials sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes, Preprint 81–544, in situ testing to evaluate liquefaction susceptibility, *ASCE National Convention, Missouri*, pp 81–544.
- Stalin VK, Vurukan Arun BR, 2014, Geographic information system for the development of soil suitability map in south Chennai, India, *Arab J Geosci*. 4. Doi:10.1007/s12517-014-1323-0.
- Tarawneh B., 2017, Predicting standard penetration test N-value from cone penetration test data using artificial neural networks, *Geoscience Frontiers* 8 pp. 199-204.
- Terzaghi K, Peck RB, 1948, *Soil mechanics in engineering practice*, 1st ed. John Wiley & Sons, New York, 566.
- Topsakal E, Topal T, 2014, Slope stability assessment of a re-activated landslide on the Artvin-Savsat junction of a provincial road in Meydancik, Turkey. *Arab J Geosci*. 4. Doi:10.1007/s12517-013-1210-0.
- Venkatesh K., 2011, Prediction of SPT N-Value Using Artificial Neural Network Technique, *Int. J. on Recent Trends in Engineering & Technology*, Vol. 05, No. 03.
- Yılmaz I., Erzin Y., 2004, On the Reliability of SPT-N value as an Indication of Consistency of Clayey Soils, *EJGE*.