[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

برآورد خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک‌های رسی مارنی تبریز بر اساس عدد SPT

علیرضا علیزاده مجدی*، روزبه دبیری؛
گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخ: دریافت ۹۶/۱۱/۰۸ پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

چکیده

آزمون نفوذ استاندارد (SPT) یکی از متداول‌ترین‌ترین آزمایش‌ها در تحقیقات ژئوتکنیک است. در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد، برآورد خصوصیات خمیری و فیزیکی خاک‌های رسی باروش‌های آماری بررسی شده است. محدودهٔ بررسی شده مربوط به انواع لایه‌های رسی و مارنی در شهر تبریز واقع در شمال‌غرب ایران است. دو گمانه ماشینی حفاری شده و آزمایش نفوذ استاندارد به‌همراه سایر آزمون‌های آزماشگاهی برای تعیین همهٔ خصوصیات خمیری و فیزیکی روی نمونه‌های تهیه شده انجام شد. با استفاده از نتایج پژوهش‌های پروژه‌های مهم موجود در منطقه، بانک اطلاعاتی مشتمل بر ۱۰۷ سری از خصوصیات لایه‌های منطقه تهیه شد. ضریب هم‌بستگی اسپیرمن بین خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک شامل درصد رطوبت طبیعی، درصد ریزدانه و درصد ذرات رسی، حد روانی، حد خمیری، دامنهٔ خمیری، شاخص استحکام، فعالیت، تخلخل اولیه، وزن مخصوص خشک و تنش مؤثر قائم با عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده تعیین شد. ۸ رابطهٔ تجربی موجود برای برآورد نفوذ استاندارد تصحیح شده با داده‌های این تحقیق صحت‌سنجی شد. برای این روابط عموماً نتیجه ضعیف از نظر ضرایب آماری شامل ضریب تبیین (R^2)، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و شیب خط رگرسیون(CR) به‌دست می‌آید. با استفاده از رگرسیون غیرخطی و بر اساس داده‌های تحقیق حاضر، هشت رابطهٔ تجربی جدید بررسی و پیشنهاد شد. ضریب تبیین، خطای ریشه میانگین مربعات و شیب خط رگرسیون برای روابط پیشنهادی نسبت به روابط موجود بهبود یافته

*نویسنده مسئول alimajdii@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

است. ضرایب آماری برای مناسب‌ترین رابطه به‌منظور برآورد شاخص استحکام خاک با استفاده از نفوذ استاندارد تصحیح شده حدود ۰٫۷ با خطای ۰/۱۲۹ به‌دست آمد. هم‌چنین دو رابطه برای هم‌بستگی تنش مؤثر قائم و عمق نمونه با نفوذ استاندارد تصحیح شده پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: عدد نفوذ استاندارد، خصوصیات خمیری، خاک‌های مارنی رسی تبریز ، روابط تجربی.

مقدمه

آزمایش نفوذ استاندارد SPT[1] یکی از آزمایش‌های قدیمی و متداول در بررسی‌ها و تحقیقات ژئوتکنیکی یک منطقه است. این آزمایش در سال ۱۹۲۷ ابداع شده و در حال حاضر به‌طور گسترده در سراسر دنیا به‌کار گرفته می‌شود. نتایج این آزمایش به‌عنوان معیاری ساده، ارزان و ملموس در جامعهٔ مهندسان ژئوتکنیک شناخته شده است. بسیاری از روابط و روش‌های محاسباتی و قضاوت‌های مهندسی ژئوتکنیک به نتیجهٔ این آزمایش وابسته است. به‌منظور انجام این آزمایش نیاز به حفاری گمانه است. با توجه به توسعهٔ کاربرد نتایج این آزمایش در دنیا و نقش آن در طراحی‌های ژئوتکنیکی، بررسی هم‌بستگی نتایج این آزمایش با سایر خصوصیات خاک‌ها می‌تواند بسیار سودمند و کاربردی باشد. در این خصوص تحقیقات گسترده‌ای در نقاط مختلف دنیا انجام شده لیکن با توجه به تنوع رفتار خاک‌ها در مناطق مختلف، بررسی و صحت‌سنجی روابط حاصل برای خاک هر منطقه تأکید می‌شود. شایان ذکر است در کنار انجام آزمایش نفوذ استاندارد، آزمایش‌های متعدد و متنوع دیگری در دنیا مانند نفوذ مخروط، پرسیومتر، دیالاتومتر و برش پره نیز به‌منظور بررسی خصوصیات مخصوصاً خاک‌های چسبنده استفاده می‌شوند [۱]. کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد در دنیا بیش‌تر است و به نتایج آن بیش‌تر در طراحی‌های ژئوتکنیک توجه می‌شود. در تحقیق حاضر هم‌بستگی بین نتایج آزمایش نفوذ استاندارد و خصوصیات خاک‌های چسبنده رسی مارنی واقع در محدودهٔ شهر تبریز بررسی شده است. در این تحقیق ضمن ارزیابی نتایج تحققیات مختلف براساس داده‌های خاک منطقهٔ بررسی شده، مجموعه روابط مناسب‌تری ارائه و

1. Standard Penetration Test

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

پیشنهاد شده است. با تعیین و توسعه روابط بین خصوصیات خاک‌های چسبنده و نتایج آزمایش نفوذ استاندارد، امکان برآورد این خصوصیات به‌کمک نتایج آزمایش نفوذ استاندارد فراهم می‌شود.

مواد و روش‌ها

۱. مرور ادبیات فنی

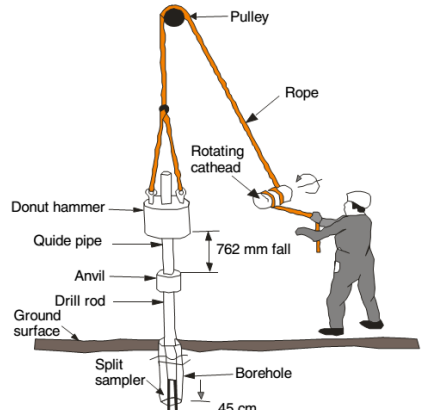
برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ آقای اتربرگ[1] خصوصیات خمیری خاک‌های چسبنده را با سه درصد رطوبت معین محدوده‌بندی کردند که این درصد رطوبت‌های معین را حدود خمیری یا حدود اتربرگ می‌نامند. اهم این حدود شامل حد انقباض[2] SL ، حد خمیری[3] PL وحد روانی[4] LL هستند که به محدودهٔ تغییرات درصد رطوبت خاک در حالت خمیری اصطلاحاً دامنه خمیری[5] PI گفته می‌شود و از تفاضل حد روانی و حد خمیری به‌دست می‌آید [۲]. حدود خمیری یکی از مهم‌ترین خصوصیات خاک‌های چسبنده رسی و سیلتی است و همواره در پژوهش‌های ژئوتکنیکی در هر نوع پروژه و سازه تهیه و گزارش می‌شود.

آزمایش نفوذ استاندارد در سال ۱۹۲۷ ابداع شده است. این آزمایش از آزمایش‌های مشهور صحرائی محسوب می‌شود. روش آزمایش برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ به‌وسیلهٔ استاندارد ASTM[6] ارائه شد. انجام آزمایش نفوذ استاندارد در استانداردهای انگلستان (BS 1377,1975)، اروپا (Euro code 7,1997) و ترکیه (TSE5744,1988) نیز ارائه شده است [۳]. در ایران نیز دستورالعملی با شمارهٔ استاندارد ۱۸۲-الف در سال ۱۳۷۹ باعنوان "دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)" به‌وسیلهٔ استاندارد مهندسی آب کشور وابسته به وزارت نیرو تدوین شده است [٤]. آزمایش نفوذ استاندارد، نفوذ یک نمونه‌گیر در داخل خاک به‌منظور تهیهٔ نمونه دست‌خورده خاک و اندازه‌گیری مقاومت خاک در برابر نفوذ نمونه‌گیر را توصیف می‌کند. در این آزمایش به‌طور خلاصه تعداد سقوط چکش استاندارد به وزن ۲±۱۴۰پوند معادل ۹± ۶۲۳ نیوتن یا۶۳/۵ کیلوگرم از ارتفاع ۱±۳۰ اینچ معادل۰/۰۳± ۰/۷۶

1. Eterberg,1965
2. Shrinkage Limit
3. Plasticity Limit
4. Liquid Limit
5. Plastic Index
6. American Standard Testing of Material

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

متر به‌صورت آزاد به‌همراه میله حفاری روی نمونه‌گیر را در سه مرحله نفوذ و برای هر مرحله ۰/۵ فوت نفوذ یعنی ۰/۱۵ متر در خاک شمارش می‌شود. نتیجه آزمایش، عدد N از جمع تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۱۵ سانتی‌مترهای دوم و سوم به‌دست می‌آید[۵]. روش انجام آزمایش SPT بروش دستی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. روش انجام آزمایش SPT بروش دستی[۳]

به‌منظور هم‌سان کردن نتایج آزمایش SPT ضرایب اصلاحی برای نتایج این آزمایش ارائه شده است. به این منظور عمدتاً از روش اصلاح NCEER[1] استفاده می‌شود. در این روش نتایج نفوذ استاندارد برای ۶۰ درصد سطح انرژی به‌دست آمده از رابطهٔ (۱) اصلاح می‌شود [۶]:

$$(N_1)_{60}=N.C_N.C_E.C_B.C_R.C_S \qquad (۱)$$

که در آن N تعداد ضربات نفوذ استاندارد، C_E ضریب تأثیر انرژی مربوط به نوع چکش، C_B ضریب تصحیح قطر گمانه، C_R ضریب تصحیح طول میله، C_S ضریب تصحیح نوع نمونه‌گیر (با یا بدون پوشش) و C_N ضریب تأثیر سربار مؤثر با توجه به رابطهٔ (۲) است [۶].

$$C_N = (Pa/\sigma'_{vo})^{0.5} \qquad (۲)$$

دراین رابطه P_a فشار اتمسفر و σ'_{vo} فشار مؤثرقائم در عمق مورد نظر است. ضرایب تصحیح این روش در جدول ۱ ارائه شده است.

1. National Center for Earthquake Engineering Research

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

جدول ۱. ضرایب اصلاحی روش NCEER-97 [٦]

همبستگی	ضریب	متغییر تجهیزات	عامل
$(Pa / \sigma'_{vo})^{0.5}$	C_N		فشار سربار
$C_N < 2$			
۰/۵–۱/۰	C_E	چکش دونات	نسبت انرژی
۰/۷–۱/۲		چکش ایمن	
۰/۸–۱/۳		چکش اتوماتیک	
۱/۰	C_B	۶۵–۱۱۵ میلی‌متر	قطر گمانه
۱/۰۵		۱۵۰ میلی‌متر	
۱/۱۵		۲۰۰ میلی‌متر	
۰/۷۵	C_R	۳–٤ متر	طول میله حفاری
۰/۸۵		٤–٦ متر	
۰/۹۵		٦–۱۰ متر	
۱/۰		۱۰–۳۰ متر	
<۱/۰		۳۰ متر<	
۱/۰	C_S	نمونه گیر استاندارد	روش نمونه‌گیری
۱/۱–۱/۳		نمونه گیر بدون پوشش	

نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در ارتباط با رفتار مقاومتی و تراکم‌پذیری خاک است. خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک‌های رسی در ارتباط با رفتار فیزیکوشیمیایی ذرات خاک است و با رفتار مقاومتی این خاک‌ها مرتبط است. روابط تجربی زیادی بین خصوصیات خمیری و سایر پارامترها مانند ضرایب نشست، پارامترهای مقاومتی خاک‌ها و خصوصیات تورمی خاک‌ها ارائه شده است. به‌عنوان نمونه پیشنهاد روابط تجربی برای ارزیابی پارامترهایی مانند شاخص فشردگی خاک[1] **Cc** که با خصوصیات تراکمی خاک ارتباط تنگاتنگ دارد با استفاده از حد روانی و درصد رطوبت طبیعی از قبیل روابط (۳) الی (۵) که محققان مختلف (ترزاقی[2] و پیک[3] (۱۹٦۷) و کاپولا[4] (۱۹۸۱) و مینی[5] (۱۹۸۰)) ارائه کرده‌اند نیز مؤید این موضوع است [۷]. از این‌رو، می‌توان هم‌بستگی بین خصوصیات مختلف خاک

1. Compression index
2. Terzaghi
3. Peck
4. Koppula
5. Myne

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

از جمله نتایج آزمایش‌های صحرائی مانند نفوذ استاندارد با این خصوصیات که موضوع تحقیق حاضر است را بررسی کرد.

$$Cc = ۰,۰۰۹(LL-10) \quad (۳)$$

$$Cc = 0.009w_n+0.005LL \quad (٤)$$

$$Cc= (LL-13)/109 \quad (۵$$

۲. پیشینهٔ تحقیق

پیشنیهٔ تحقیق در خصوص آزمایش نفوذ استاندارد با توجه به‌کاربرد وسیع این آزمایش در تحقیقات و حتی در پروژه‌های اجرائی خیلی گسترده است. در این بخش سعی شده تا خلاصه‌ای از سوابق مرتبط با موضوع تحقیق حاضر گنجانده شود.

پس از ابداع آزمایش نفوذ استاندارد، به‌دلیل اثرات عوامل مختلف بر نتایج آزمایش، اصلاحات مختلف برای نتایج آن ارائه شده است. اصلاح نتایج آزمایش نفوذ استاندارد به‌دلیل تأثیر فشار سربار و هم‌چنین تأثیر مجاورت طول میله حفاری با جدارهٔ گمانه به‌وسیلهٔ گیبس[1] و همکاران (۱۹۵۷) ارائه شد [۸]. لاکرویکس[2] و همکاران برای ارتباط مقاومت نفوذ غیراستاندارد با حالت استاندارد، ضریب اصلاحی پیشنهاد کردند [۹]. سکمپتن[3] تعداد ضربات اصلاح شده **(N_{60})** برای نفوذ استاندارد را با توجه به‌روش صحرائی و تجهیزات، اثر راندمان چکش، گمانه، طول میله حفاری و مغزه‌گیری ارائه کرد[۱۰]. در بیش‌تر تحقیقات، اصلاحات نتایج آزمایش نفوذ استاندارد به‌عمل آمده براساس گزارش سال ۱۹۹۷ مؤسسه **NCEER** انجام می‌شود [٦].

برای اولین بار استفاده از نتایج آزمایش **SPT** به‌وسیلهٔ ترزاقی و پیک (۱۹٤۸) به‌منظور تعیین ظرفیت باربری ماسه‌ها ارائه شد [۷]. محققان زیادی روی ارائه روابط تجربی بین نتایج نفوذ استاندارد و مدول برشی و یا با سرعت موج برشی تحقیق کرده‌اند [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]. تعداد زیادی از روابط تجربی برای ارتباط بین نتایج ضربات نفوذ استاندارد و سایر پارامترهای آزمایش‌های محلی وجود دارد که به‌عنوان نمونه در خصوص ارتباط بین نتایج

1. Gibbs
2. Lacroix
3. Skempton

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

نفوذ استاندارد و پرسیومتری می‌توان به تحقیقات کیاباسی[1] (۲۰۱۲) اشاره کرد [۱۵]. در بارهٔ ارتباط بین نتایج آزمایش نفوذ مخروط و ضربات نفوذ استاندارد تحقیقاتی بر خاک‌های مختلف ماسه‌ای، سیلتی و رسی موجود است [۱٦]. نفود استاندارد به‌طور گسترده در تحقیقات ژئوتکنیکی نیز استفاده می‌شود. تاپسکال[2] و همکاران در سال ۲۰۱٤ پایداری یک شیب را با برنامه‌ریزی و انجام آزمایش نفوذ استاندارد در داخل گمانه‌هایی دریک لغزش دوباره فعال شده بررسی کردند. طبق نتایج جالب این تحقیق، بین سطح لغزش و مقادیر نفوذ استاندارد رابطه وجود دارد به‌نحوی‌که در نزدیکی سطح گسیختگی مقادیر نفوذ استاندارد کاهش می‌یابد [۱۷]. استیلن[3] و همکاران (۲۰۱٤) کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد برای سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌منظور توسعهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی خاک را بررسی کرداند [۱۸]. در خصوص ارتباط بین نتایج نفوذ استاندارد به‌منظور ارزیابی پدیدهٔ روان‌گرایی تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است [۱۹]. در مورد ارتباط بین نفوذ استاندارد و مقاومت برشی زهکشی نشده نیز تحقیقات متعددی موجود است [۲۰]. کیاباسی در سال ۲۰۱۵ پژوهشی به‌منظور برآورد تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد بر اساس خصوصیات خاک شامل درصد قطر دانه‌ها، درصد رطوبت، حدود اتربرگ، فعالیت و درصد ذرات رسی روی ۲۲۰ نمونه با استفاده از رگرسیون ساده و غیرخطی چندگانه در نرم افزار **SPSS** انجام داد. تحلیل‌های رگرسیون چندگانه با دو پارامتر ورودی مستقل، نتایج قابل تأییدی نسبت به تحلیل‌های رگرسیون ساده نتیجه می‌دهد. خلاصه روابط پیشنهادی کیاباسی در جدول ۲ ارائه شده است [۳].

هوشمند و همکاران (۲۰۱۲) روی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مارن تبریز پژوهش‌هایی انجام دادند. در این تحقیق، خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل مارن‌های تبریز و رفتار تنش-کرنش آن‌ها با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی بررسی شده است. سه نوع از مارن‌ها در منطقهٔ تبریز به رنگ‌های زرد، سبز و خاکستری/ سبز یافت می‌شوند. در جدول ۳ خلاصه خصوصیات خمیری نمونه‌های مارن تبریز و در جدول ٤ خلاصه‌ای از نتایج نفوذ استاندارد این لایه‌ها که بر اساس روش NCEER,1997 اصلاح شده‌اند، ارائه شده است . هم‌چنین رابطهٔ (٦) برای برآورد نفوذ استاندارد بر اساس عمق نمونه پیشنهاد شده است [٦].

1. Kayabaşi
2. Topsakal
3. Stalin

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

$$N=1.2177\ D + 31.012 \quad (٦)$$

جدول۲. روابط تجربی پیشنهادی Kayabaş [۳]

متغییر وابسته	متغییر مستقل	رابطهٔ پیش‌بینی N_{60}	R^2	n
N_{60}	Ac	$N_{60} = 7.92\ \ln(Ac)+24.7$	۰/٦۲	۲۲۰
N_{60}	w	$N_{60} = -0.52(w) +31.20$	۰/٥٦	۲۲۰
N_{60}	FGP	$N_{60} = -0.21(FGP) +31.03$	۰/٥۲	۲۲۰
N_{60}	Ic	$N_{60} = 9.1166\ e^{0.537(Ic)}$	۰/٥۱	۲۲۰
N_{60}	Ac	$N_{60} = 5.55\ln(Ac) – 0.32(w)+31.7$	۰/۷۸	۲۲۰
N_{60}	W,FGP	$N_{60} = -0.344(w) – 0.122(FGP)+34.879$	۰/٦۹	۲۲۰
N_{60}	FGP,Ic	$N_{60} = 2559\ e^{0.002(Ic)} – 0.147(FGP) –2539$	۰/۷۳	۲۲۰

جدول ۳. خلاصه خصوصیات مارن تبریز [٦]

نوع مارن	طبقه بندی USCS	LL(%)	PI(%)	رطوبت (درصد)	تخلخل	دانسیته (kg/cm^3)	فشار تورم (kg/cm^3)
زرد	CL-CH	٥٥–۷٥	۳۰–۳٥	۲٥	۰/۹٥– ۰/۷٥	۱/۷۰	۱–۲
سبز	CL-CH	٥۰–٦٥	۲۰–۲٥	۲۰	۰/۸٥– ۰/٦٥	۱/۸۰	۱–۲
خاکستری/ سیاه	CL-CH, MH	٤۰–٦۰	۱٥–۲۰	۱٥	۰/۷۰– ۰/٥۰	۱/۹۰	۰/٥–۱/٥

جدول ٤. خلاصه نتایج نفوذ استاندارد نمونه‌های مارن تبریز [٦]

N_{spt}	نوع مارن
۱۰–٥۰	زرد
٤۰–٦۰	سبز
٤۰–۸۰	خاکستری / سیاه

یلماز[1] و همکاران (۲۰۰٤) تحقیقاتی روی رابطه بین خصوصیات مقاومت برشی و عدد نفوذ استاندارد در خاک‌های رسی انجام دادند. بر اساس نتایج این تحقیق مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌های رسی هم‌بستگی خوبی با نتایج آزمایش نفوذ استاندارد دارد [۲۱].

1. Yılmaz

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

در تحقیق حاضر با توجه به انواع خاک‌های مارنی رسی گسترش یافته در شهر تبریز سعی شده تا روابط جدیدی به‌منظور برآورد خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد توسعه و پیشنهاد شود.

۳. معرفی زمین‌شناسی عمومی منطقهٔ بررسی شده

در شهر تبریز انواع خاک‌های چسبنده رسی سیلتی و مارنی گسترش یافته است. سن زمین‌شناسی این لایه‌ها به دوران میوسن و پلیوسن بر می‌گردد. بیش‌تر این لایه‌ها به بستر باغمیشه متعلق هستند. از نظر زمین‌شناسی بستر باغمیشه بین بستر قرمز بالایی و بستر ماهی متعلق به دوران پلیوسن قرار می‌گیرد. این لایه‌ها در اثر حرکات تکتونیکی اواخر دوران سوم زمین‌شناسی دچار چین‌خوردگی وگسلش شده‌اند. گسل مشهور تبریز از شمال منطقه تحقیق عبور می‌کند. از جمله رودخانه‌های مهم منطقه مهرانه‌رود (یا قوری‌چای) است که از قسمت جنوبی محدوده این تحقیق عبور می‌کند [٦]. از این‌رو، ژئومورفولوژی منطقه تحقیق حاصل تأثیر نیروهای تکتونیکی، فعالیت گسل‌ها، چین‌ها و فرسایش است. فرسایش و رسوب‌گذاری به‌وسیلهٔ رودخانه‌ها نیز از عوامل مهمی هستند که در شکل‌دهی زمین‌شناسی منطقه نقش مؤثری داشته‌اند. لایه‌های مارنی سنگ کف منطقه بوده است و رسوبات درشت‌دانه جوان‌تر مربوط به دوران کواترنری روی آن‌ها قرار گرفته است. این لایه‌ها عمدتاً در شمال وشمال شرقی و بخشی در جنوب شهر رخنمون دارند (شکل ۲).

به‌دلیل توجه کم به خصوصیات این لایه‌ها و طراحی‌های نامناسب روی این لایه‌ها، خسارت‌های چشم‌گیری در برخی سازه‌های واقع در مناطقی از این شهر به‌وجود آمده است که از آن جمله می‌توان به کوی فرشته و بخشی از شهرک باغمیشه، کوی ولیعصر، کوی نگین پارک و گلکار اشاره کرد. به‌دلیل اهمیت بررسی خصوصیات این لایه‌ها، پژوهش‌های محققان مختلف (از قبیل [٦]، [۲۲]، [۲۳]) روی آن‌ها انجام شده است. در شکل ۳ نمونه‌هایی از مشکلات سازه‌های احداث شده در این مناطق ارائه شده است [۲٤].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

شکل ۲. برونزد لایه‌های مارنی در محدودهٔ شمال شرق شهرتبریز (کوی گلکار)

شکل ۳. نمونه‌هایی از مشکلات سازه‌ها در خاک‌های رسی شهر تبریز، الف) نشست و ناپایداری، نگین پارک [۲۴]، ب) انحراف سازه در اثر نشست، باغمیشه و ارم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

٤. تحقیقات ژئوتکنیکی

تحقیقات در دو بخش میدانی و تحلیلی برنامه‌ریزی شد. در بخش میدانی ابتدا نتایج پژوهش‌های ژئوتکنیک پروژه‌های موجود در منطقه تحقیق شامل گزارش‌های [۲۵]، [۲٦] بررسی و استفاده شد. دو گمانه ماشینی نیز به‌روش دورانی به قطر تا ٤ اینچ در محدودهٔ تحقیق حفاری شده و آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرائی انجام شد. آزمایش نفوذ استاندارد طبق استاندارد ASTM 1586-11 [۵] از هر عمق حدود یک متری انجام شد. روی ١٤ نمونهٔ دست‌نخورده تهیه شده از گمانه‌ها در آزمایشگاه، خصوصیات فیزیکی خاک شامل دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM -D422 [۲۷]، دانسیته و درصد رطوبت نمونه‌ها طبق استاندارد [۲۸] ASTM D2216 وحدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 [۲۹] تعیین شد. موقعیت دوگمانه حفر شده شامل

(B1:38°4’5.21"N,46°20’29.66"E; B2:38°,3’,9.95"N,46°,23’,4.19"E)

در شکل ٤ به‌همراه گمانه‌های موجود در منطقه نشان داده شده است. در گمانهٔ B1 تا عمق حدود ۱ متری لایه خاک سطحی از مارن زرد رنگ هوازده قرار داشته که با افزایش عمق به‌تدریج رطوبت و میزان فشردگی افزایش می‌یابد. رنگ لایه به‌تدریج تیره شده و از عمق ۵ متری تا انتها گمانه به‌رنگ سبزتیره و زیتونی متمایل می‌شود. در گمانهٔ B2 عمق لایه دست‌خورده سطحی حدود ۰/۵ متر است و از نوع مارن زرد به‌رنگ قهوه‌ای روشن است. در این گمانه نیز با افزایش عمق تا انتهای گمانه، به‌تدریج بر میزان رطوبت و فشردگی لایه افزوده می‌شود. نوع لایه‌بندی به‌صورت مارن مطبق زردرنگ متمایل به قهوه‌ای روشن است. در هر دوگمانه سطح آب زیرزمینی مشاهده نمی‌شود. شکل ۵ تصویری از حفره ایجاد شده در اثر انجام آزمایش (SPT) مربوط به گمانهٔ B2 را نشان می‌دهد.

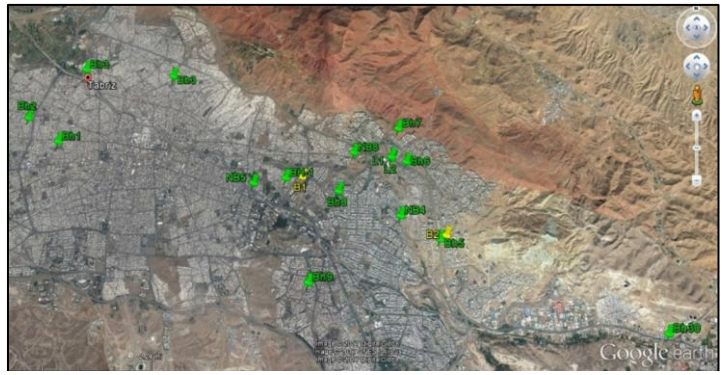
نتایج وتفسیر داده‌ها

در مجموع ۱۰۷ سری از نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام یافته بر ١٤ نمونه از دو گمانه حفاری شده به‌همراه ۹۳ سری از نتایج آزمایش‌های پژوهش‌های موجود منطقه، جمع‌بندی شد. تعدادی از خصوصیات مهم خاک نیز برای هر نمونه مانند تخلخل از روابط وزنی و حجمی محاسبه شد. ۱۱ متغیر بر اساس خصوصیات خاک‌های چسبنده شامل درصد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]



شکل ٤. موقعیت گمانه‌های تحقیق بر تصویرهوایی تبریز (www.Google.com/earth/2016)

گمانه‌های حفر شده در این تحقیق :B1,B2 گمانه‌های موجود:NB4,5,8 , L1,2, BH-1 Bh1- 9,30,

شکل ۵. حفره آزمایش نفوذ استاندارد در داخل مغزه نمونه (گمانه B2)

ذرات ریزدانه عبوری از الک ۲۰۰(FGP[1])، حد روانی(LL)، حد خمیری (PL)، درصد ذرات رسی (C)، دامنه خمیری (PI)، شاخص استحکام (CI[2]) ، فعالیت (A[3])، وزن مخصوص خشک (γ_d) ، درصد رطوبت طبیعی (w_n)، تخلخل اولیه (e_o)، تنش مؤثر قائم در جا (σ'_v) در نظرگرفته شد. نتایج آزمایش نفوذ استاندارد انجام شده از هر یک متر در

1. Finer grain percent
2. Consistency index
3. Activity

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

گمانه‌های حفر شده، بر اساس روش NCEER,97 تصحیح شده است. به‌عنوان نمونه در شکل ٦، تغییرات متغیرهای PI, e_o, N_{60} نسبت به عمق در دو گمانه تحقیق ترسیم شده است. توصیف آماری کل ۱۰۷ سری داده تحقیق به‌وسیلهٔ نرم‌افزار (SPSS,16) طبق جدول ۵ ارائه شده است. شاخص استحکام (CI) مقدار کم‌تری داشته و حالت نمونه‌های مأخوذه عمدتاً در محدوده خمیری هستند.

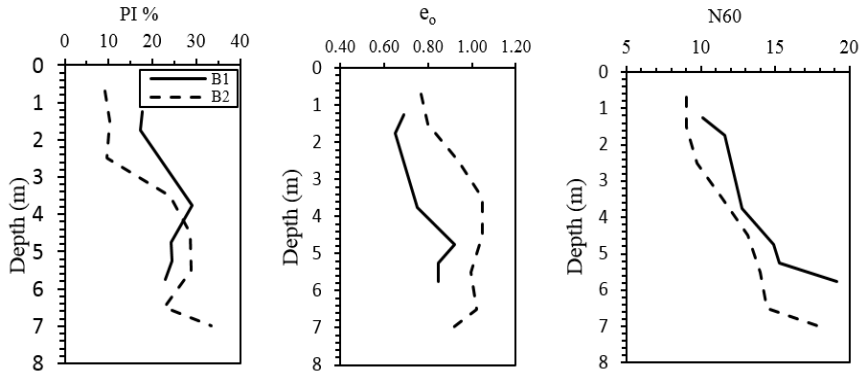
جدول ۵. توصیف آماری متغیرهای تحقیق (n=107)

متغییر	انحراف معیار استاندارد	میانگین	حداکثر	حداقل
درصد ذرات ریزدانه (٪)	۸/۷۵۱	۸۰/۸۵	۹۸/۷۰	٦۵/۰۰
حد روانی (٪)	۱۱/۲۷۸	۵٦/۷۸	۷۷/۰۰	۲۹/۰۰
حد خمیری (٪)	۷/۱۹٤	۳۰/۱۵	٤۲/۳۹	۱۲/۰۰
درصد ذرات رسی (٪)	۸/۹۳۸	٤۹/٤٤	۷۰/۰۰	۳۲/۰۰
دامنه خمیری (٪)	٦/۰٦۷	۲٦/٦۳	٤۵/۰۰	۹/۱۹
شاخص استحکام	۰/۳۰۳	۰/۹۸	۱/٦۹	۰/۱٤
فعالیت	۰/۱۳۲	۰/۵۵	۰/۹٦	۰/۲۰
وزن مخصوص خشک(gr/cc)	۰/۰۹۷	۱/۵۹	۱/۸۵	۱/۲٦
درصد رطوبت طبیعی (٪)	۵/٤۷٤	۲٦/٦٦	۳۷/۹٤	۱٦/۳۰
تخلخل	۰/۱۲٤	۰/۷۲	۱/۱۵	۰/٤٦
تنش موثر قائم(kpa)	۱۵۸/۳٦٦	۲٦٦/۵۵	٦۱۵/۸۰	۱٦/۸۵
نفوذ استاندارد صحرائی(N)	٦/٦۲٦	۳۸/٤٤	۵٦/۰۰	۲٤/۰۰
نفوذ استاندارد اصلاح شده N_{60}	٤/۱٤٤	۱۸/٤۱	۲۸/۰۰	۹/۰۰

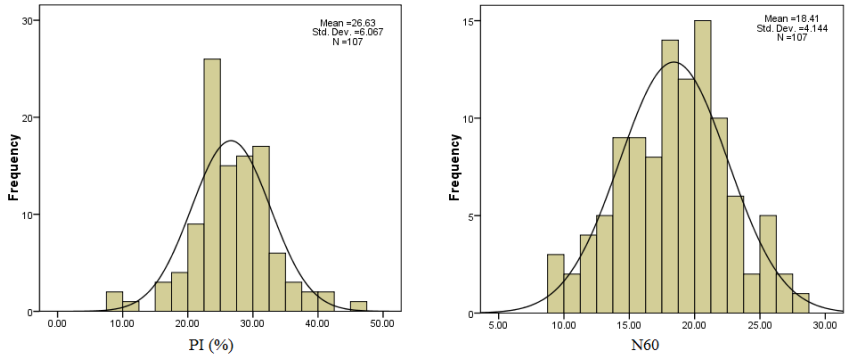
توزیع فراوانی داده‌های تحقیق برای انواع خاک‌های رسی تبریز شامل انواع مارن‌های زرد، زیتونی و خاکستری و خاک‌های رسی– سیلتی دارای پراکندگی مناسب است. به‌عنوان نمونه هیستوگرام توزیع فراوانی دامنهٔ خمیری با محدودهٔ تغییرات (9.19~45%) و عدد نفوذ استاندارد N_{60} با محدوده تغییرات (9~28) در مقایسه با منحنی توزیع نرمال در شکل ۷ ارائه شده است. خصوصیات خمیری داده‌های تحقیق در نمودار خمیری خاک‌ها مطابق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

شکل ۸ ارائه شده است. بر اساس طبقه‌بندی (USCS) نمونه‌های خاک رسی شهر تبریز در رده‌های CL,CH,ML,MH قرار دارند.



شکل ٦. نمودار تغییرات متغیرهای مهم تحقیق نسبت به عمق گمانه‌های حفرشده



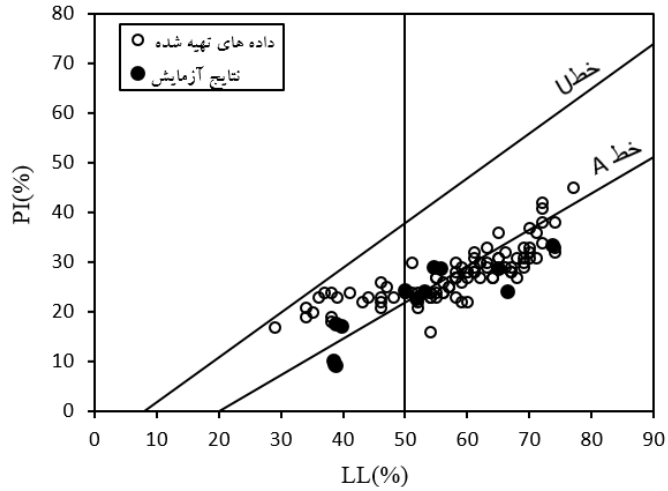
شکل ۷. هیستوگرام توزیع فراوانی دامنهٔ خمیری و عدد نفوذ استاندارد N60

هم‌بستگی بین متغیرهای تحقیق شامل ۱۱ متغیر (LL, PL, PI, C, FGP, e_o, w_n, CI, A, γ_d, σ'_v) نسبت به عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده (N_{60}) با استفاده از نرم‌افزار (SPSS,16) با روش رتبه‌بندی اسپیرمن[1] تعیین شد. نتیجه بررسی طبق هیستوگرام شکل ۹ ارائه شده است. مقدار ضریب ۱+ و۱- به‌معنی به‌ترتیب هم‌بستگی کامل مثبت و منفی بین دو متغیر است. بیش‌ترین هم‌بستگی مثبت به‌ترتیب مربوط به شاخص استحکام (۰/۷۷۲)، تنش

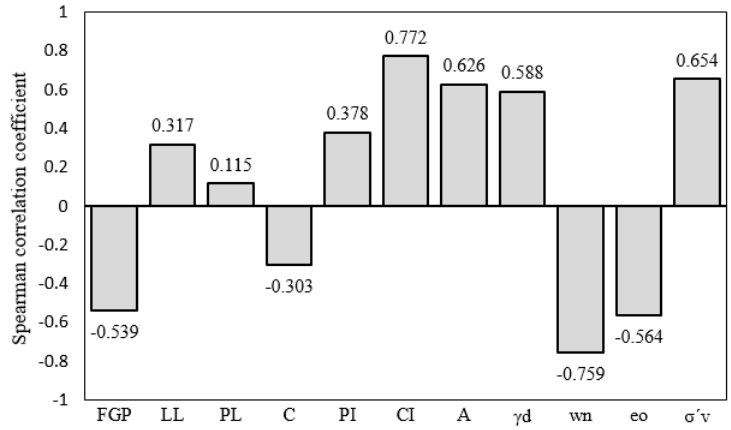
1. Spearman

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

مؤثرقائم (۰/٦٥٤)، فعالیت خاک (۰/٦٢٦) و وزن مخصوص خشک (۰/٥٨٨) است. به‌عبارت دیگر با افزایش در مقدار عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده، افزایش در مقادیر هر یک از این متغیرها انتظار می‌رود. بیش‌ترین هم‌بستگی منفی نیز به‌ترتیب مربوط به درصد رطوبت (۰/٧٥٩)، تخلخل (۰/٥٦٤) و درصد ذرات عبوری از الک۲۰۰ (۰/٥٣٩) است. به‌عبارت دیگر و چنان‌که انتظار می‌رود با افزایش درصد رطوبت، تخلخل و یا درصد ذرات ریزدانه، عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده کاهش می‌یابد.



شکل ۸. خصوصیات خمیری داده‌های تحقیق حاضر



شکل ۹. هیستوگرام ضریب هم‌بستگی اسپیرمن داده‌های تحقیق نسبت به N_{60}

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

صحت‌سنجی روابط تجربی موجود

طبق سوابق قبلی چنان‌که ذکر شد، هشت رابطهٔ تجربی اخیر در خصوص هم‌بستگی بین عدد نفوذ استاندارد و سایرخصوصیات خاک در نظر گرفته شد. هفت رابطهٔ پیشنهاد شده به‌وسیلهٔ کی‌عباسی [۳] **و** یک رابطه نیز بر اساس نتایج آزمایش‌ها روی نمونه‌های مارن تبریز به‌وسیلهٔ هوشمند و همکاران [٦] انتخاب شد. روابط موجود بر اساس برآورد نفوذ استاندارد با استفاده از خصوصیات خمیری ارائه شده‌اند که با استفاده از داده‌های این تحقیق ارزیابی شدند. روابط مذکور برای ۱۰۷ سری از داده‌های تحقیق حاضر مربوط به خاک‌های رسی تبریز، صحت‌سنجی شده و نتیجه با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[1]) و ضریب تبیین[2] (R^2) به‌ترتیب طبق روابط (٤)و(٥) [۳۰] و شیب خط رگرسیون (CR[3]) در جدول ٦ ارائه شده است. در این روابط پارامترهای x_{mi} ، x_{pi} به‌ترتیب مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و x_{ave} میانگین متغیر اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است

$$RMSE = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n}(Xmi-Xpi)^2}{n}}\right) / X_{ave} \qquad (۷)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n}(X_{mi}-X_{pi})^2}{\sum_{i=1}^{i=n}(X_{mi}-X_{ave})^2} \qquad (۸)$$

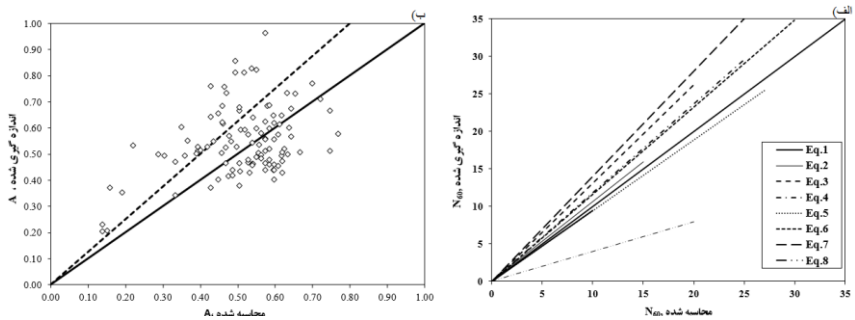
جدول ٦. ارزیابی روابط تجربی موجود برای داده‌های تحقیق حاضر (n=107)

ردیف (Eq.)	مرجع	رابطه	RMSE	R^2	CR
۱	کیاعباسی (۲۰۱۵) [۳]	N_{60}= 7.92 ln(A)+24.70	۰,۱۷۹	۰,٤٤٤	۰,۹٤۰
۲		N_{60}= -0.52 w_n+31.2	۰,۱٦٥	۰,٥۲٥	۱,۰٦۲
۳		N_{60}=0.21 FGP+31.03	۰,۳۰۲	۰,۳۰۸	۱,۳۰۹
٤		N_{60}=9.1166 Exp(0.537CI)	۰,۲۰۷	۰,٦۲۹	۱,۱۸۰
٥		N_{60}=5.55 ln(A)-0.32 w_n+31.7	۰,۱٤۷	۰,٦٥۰	۰,۹٤۲
٦		N_{60}=-0.344 w_n-0.122 FGP+34.879	۰,۲۰۹	۰,٥۲٤	۱,۱٦۱
۷		N_{60}=2559 Exp(0.002 CI)-0.147 FGP-2539	۰,۳۱۹	۰,٦٦٥	۱,٤۰۲
۸	هوشمند و همکاران (۲۰۱۲)	N_{60}=1.12(D+25.5)	۱,٥٤۲	۰,۳٤۰	۰,۳۹۷

1. Root mean squared error
2. Coefficient of determination
3. Correlation ratio

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

طبق جدول ٦ بزرگ‌ترین ضریب تبیین با کم‌ترین خطا مربوط به روابط ۲، ٤، ۵ .Eq است که بر اساس درصد رطوبت (w_n)، شاخص استحکام (CI) و ترکیب درصد رطوبت طبیعی (w_n) و فعالیت (A) ارائه شده‌اند. کم‌ترین ضریب تبیین با بیش‌ترین خطا نیز مربوط به رابطهٔ ۸ .Eq است که بر اساس برآورد عدد نفوذ استاندارد بر حسب عمق نمونه (D) تعریف شده است. نتایج شیب خط رگرسیون کلیه روابط موجود در شکل (۱۰–الف) ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، از نظر شیب خط رگرسیون کارایی روابط ۱،۲، ۵ .Eq بهتر از سایر روابط هستند. هم‌چنین با استفاده از روابط مذکور با استفاده از داده‌های تحقیق حاضر، خصوصیات خمیری بر اساس مقادیر نفوذ استاندارد تصحیح شده برآورد شده و به‌عنوان نمونه نتایج محاسبه شده برای فعالیت خاک (A) بر اساس نفوذ استاندارد نیز طبق رابطهٔ (۲ .Eq) در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری در شکل ۱۰ ب ترسیم شده است. عموماً ضرایب آماری روابط تجربی بر اساس داده‌های تحقیق نسبتاً ضعیف ارزیابی می‌شود.



شکل ۱۰. ارزیابی کارایی روابط تجربی موجود در مورد هم‌بستگی نفوذ استاندارد با سایر خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک برای داده‌های تحقیق حاضر (n =107)

روابط تجربی پیشنهادی

بر اساس نتایج هم‌بستگی تعیین شده بین متغیرهای تحقیق و عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده در بخش‌های قبلی برای داده‌های تحقیق، حالت‌های مختلف رگرسیون خطی، نمایی، لگاریتمی و هم‌چنین (Exponential) نیز بررسی شده است و بهترین رگرسیون با بیش‌ترین ضریب تبیین R^2 برای هر متغیر انتخاب شد. خلاصه نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

جدول ۷. ضریب تبیین رگرسیون‌های مختلف بین عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده و خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک (n=107)

متغیر	خطی **(Linear)**	**(Exponential)**	نمایی **(Power)**	لگاریتمی **(Logarithmic)**
فعالیت **(A)**	۰/۵۰۶	۰/۵۲۲	۰/۵۲۱	۰/۴۹۷
درصد رطوبت **(w_n)**	۰/۵۲۵	۰/۵۵۲	۰/۵۰۷	۰/۴۸۷
شاخص استحکام **(CI)**	۰/۵۶۲	۰/۶۳۸	۰/۵۹۲	۰/۶۱۳
درصد ریزدانه **(FGP)**	۰/۳۰۸	۰/۳۰۹	۰/۲۹۱	۰/۲۹۴
عمق نمونه **(D)**	۰/۴۵۲	۰/۵۶۴	۰/۶۲۵	۰/۴۵۵
تنش موثر قائم **(σ'_v)**	۰/۴۳۲	۰/۵۵۲	۰/۶۱۷	۰/۴۴۹

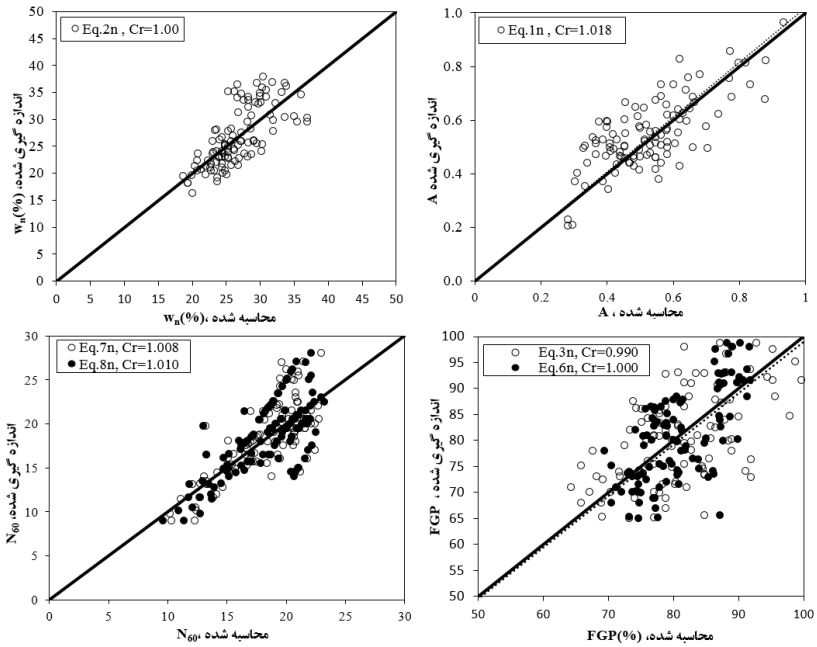
علاوه بر بررسی شش رابطهٔ یک متغیره با مناسب‌ترین رگرسیون انتخابی طبق جدول ۷، دو رابطه دو متغیره نیز با ترکیب متغیرهای با بزرگ‌ترین ضریب تبیین، به‌منظور برآورد شاخص استحکام و درصد ذرات‌ریزدانه بررسی شده و ضرایب مربوط با استفاده از رگرسیون غیرخطی در نرم‌افزار **(SPSS,16)** تعیین شدند. با توجه به این‌که معمولاً درصد رطوبت طبیعی خاک، با تهیه یک نمونه دست‌خورده به‌سهولت قابل تعیین است در روابط دو متغیره، درصد رطوبت طبیعی به‌همراه نفوذ استاندارد تصحیح شده استفاده شده است. در مجموع هشت رابطهٔ پیشنهادی در این تحقیق به‌همراه نتایج ارزیابی آماری آن‌ها در جدول ۸ خلاصه شده است.

جدول ۸. ارزیابی روابط تجربی پیشنهادی برای داده‌های تحقیق حاضر (n=107)

ردیف (Eq.)	رابطه	RMSE	R^2	CR
1n	$A= 0.160\ e^{0.063N60}$	۰/۱۸۳	۰/۵۲۱	۰/۹۵۲
2n	$w_n = 51.112\ e^{-0.036\ N60}$	۰/۱۴۳	۰/۵۲۶	۱/۰۰۰
3n	$FGP = 125.939\ e^{-0.024\ N60}$	۰/۰۹۹	۰/۳۱۰	۰/۹۹۰
4n	$CI= 0.988\ \ln(N_{60})-1.844$	۰/۱۹۳	۰/۶۳۹	۰/۹۷۷
5n	$CI =-0.4\ \ln(w_n) +0.044\ N_{60} +1.481$	۰/۱۲۹	۰/۶۷۳	۱/۰۶۹
6n	$FGP = 0.828\ w_n-0.381\ N_{60} +65.777$	۰/۱۵۸	۰/۴۸۱	۱/۰۰۰
7n	$N_{60} = 5.417\ \sigma'^{\ 0.225}_v$	۰/۱۵۵	۰/۶۱۷	۱/۰۰۸
8n	$N_{60}= 10.378\ D^{0.223}$	۰/۱۵۰	۰/۶۲۵	۱/۰۱۰

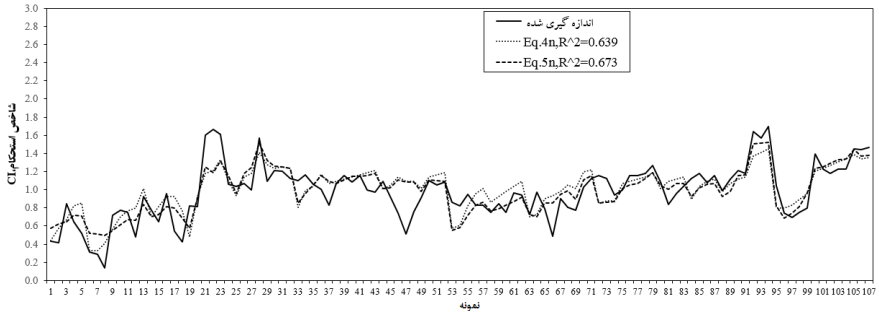
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

در بین روابط یک متغیره، رابطه لگاریتمی Eq.4n بزرگ‌ترین ضریب تبیین R^2 و کم‌ترین خطای RMSE در برآورد شاخص استحکام (CI) براساس‌نفوذ استاندارد تصحیح شده N_{60} داشته و به‌ترتیب برابر ۰/۶۳۹ و ۰/۱۹۳ را نتیجه داده است. در بین روابط دومتغیره نیز مناسب‌ترین رابطه، Eq.5n برحسب درصد رطوبت و نفوذ استاندارد تصحیح شده به‌منظور ارزیابی شاخص استحکام است. در شکل ۱۱ کارایی همهٔ روابط پیشنهادی به‌منظور برآورد فعالیت، درصد رطوبت، شاخص استحکام و درصد ریزدانه با استفاده از نفوذ استاندارد تصحیح شده ارائه شده است. هم‌چنین رابطهٔ هم‌بستگی نفوذ استاندارد تصحیح شده با تنش مؤثر قائم و عمق به‌ترتیب با روابط ۷، ۸ .Eq در این شکل نشان داده شده است. مقایسهٔ نتایج برآورد مناسب‌ترین روابط یک و دو متغیره ٤، Eq.۵ طبق شکل ۱۲ است. به‌طورکلی کارایی روابط چندمتغیره بهتر از روابط یک‌متغیره است ولی برای استفاده از روابط چندمتغیره لازم است متغیرهای بیش‌تری از خاک تعیین شود.



شکل ۱۱. کارایی روابط پیشنهادی این تحقیق به‌منظور برآورد خصوصیات فیزیکی و خمیری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]



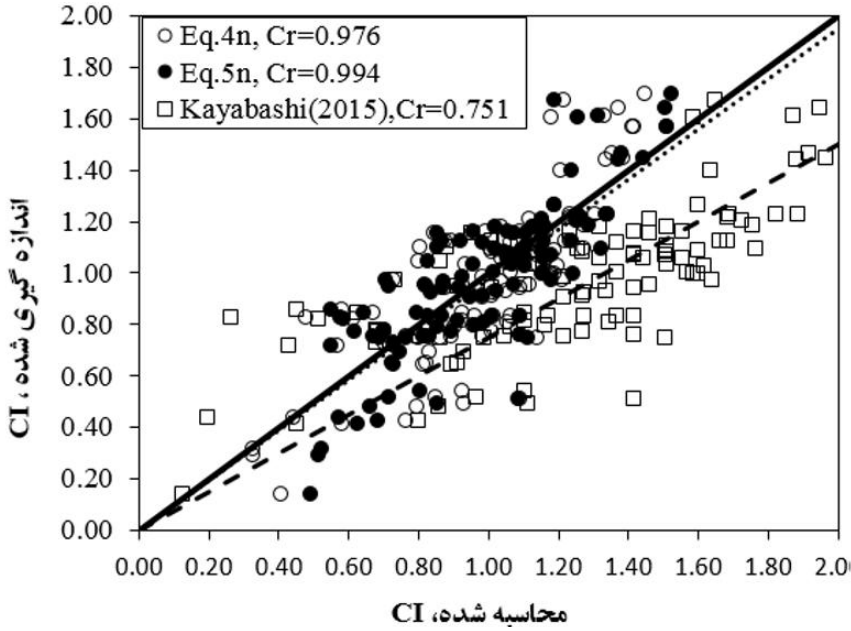
شکل ۱۲. پیش‌بینی مناسب‌ترین رابطهٔ پیشنهادی به‌منظور محاسبهٔ شاخص استحکام (CI)

از مقایسهٔ ضرایب آماری روابط پیشنهادی در این تحقیق با نتایج روابط موجود طبق جدول ۹، مشاهده می‌شود روابط پیشنهادی مخصوصاً روابط Eq.4n,5n از نقطه نظر شیب خط رگرسیون، خطا و ضریب تبیین در مقایسه با روابط موجود کارایی بهتری دارند. این موضوع به‌وضوح با مقایسهٔ کارایی رابطهٔ موجود (Eq.4) و روابط پیشنهادی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. هم‌چنین رابطهٔ خطی موجود Eq.8 با داده‌های این تحقیق عملاً ارزیابی ضعیف داشته است و در این خصوص رابطهٔ Eq.8n به‌صورت نمایی پیشنهاد شده است. رابطهٔ هم‌بستگی مناسب بین تنش مؤثر قائم و نفوذ استاندارد تصحیح شده در

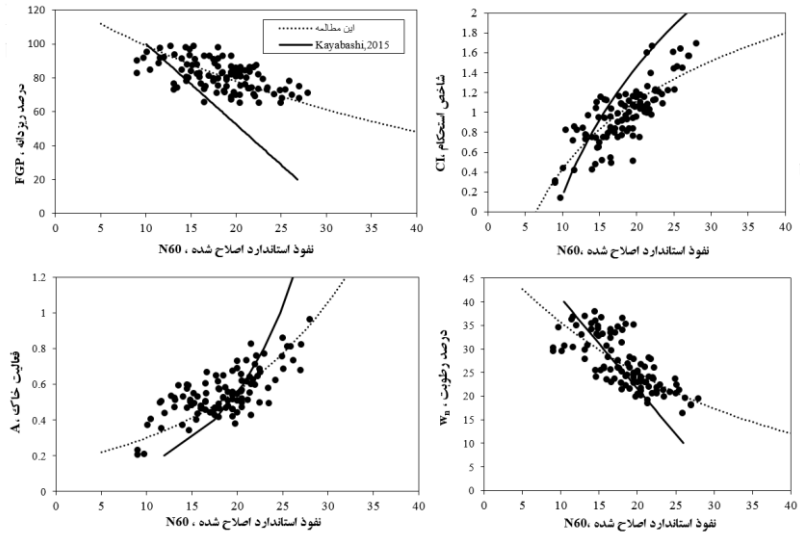
جدول ۹. مقایسهٔ کارایی مناسب‌ترین روابط موجود با روابط پیشنهادی (n=107)

ردیف (Eq.)	مرجع	رابطه	RMSE	R^2	CR
4	A.Kayabasi, (2015)[3]	$N60=9.1166\ Exp(0.537CI)$	۰/۲۰۷	۰/٦۲۹	۱/۱۸۰
5		$N60=5.55\ ln(A)-0.32\ w_n+31.7$	۰/۱٤۷	۰/٦۵۰	۰/۹٤۲
7		$N_{60}=2559\ Exp(0.002\ CI)-0.147\ FGP-2539$	۰/۳۱۹	۰/٦٦۵	۱/٤۰۲
8	A. Hooshmand et al. (2012)[6]	$N60=1.12(D+25.5)$	۱/۵٤۲	۰/۳٤۰	۰/۳۹۷
4n	این تحقیق	$CI= 0.988\ ln(N_{60})-1.844$	۰/۱۹۳	۰/٦۱۹	۰/۹۷۷
5n		$CI =-0.4\ ln(w_n) +0.044\ N_{60} +1.481$	۰/۱۲۹	۰/٦۷۳	۱/۰٦۹
7n		$N_{60} = 5.417\ \sigma'_v{}^{0.225}$	۰/۱۵۵	۰/٦۱۷	۱/۰۰۹
8n		$N_{60}= 10.378\ D^{0.223}$	۰/۱۵۰	۰/٦۲۵	۱/۰۱۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]



شکل ۱۳. مقایسهٔ کارایی روابط پیشنهادی و موجود به‌منظور برآورد شاخص استحکام (CI)



شکل ۱۴. مقایسهٔ روابط یک متغیره موجود و پیشنهادی بر اساس داده‌های تحقیق حاضر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

خاک‌های رسی تبریز نیز طبق رابطهٔ Eq.7n از نوع نمایی ارائه شده است. مقایسه روابط یک متغیره موجود و پیشنهادی، براساس داده‌های این تحقیق شامل برآورد شاخص استحکام، درصد رطوبت، درصد ریزدانه و فعالیت خاک با استفاده از نفوذ استاندارد تصحیح شده، در نمودارهای شکل ١٤ خلاصه شده است.

نتایج

خاک‌های رسی منطقهٔ تحقیق واقع در شهر تبریز، بر اساس طبقه‌بندی USCS عمدتاً در ردهٔ CH,MH,CL,ML قرار می‌گیرند. این خاک‌ها شامل انواع مارن‌های به‌رنگ زرد، زیتونی و خاکستری و خاک‌های رسی–سیلتی با دامنهٔ خمیری اندک تا قابل توجه در محدودهٔ تغییرات (٤٥%~٩/١٩) و حد روانی در محدودهٔ (٧٧% ~٢٩) را شامل می‌شوند. محدودهٔ تغییرات نفوذ استاندارد صحرایی (N_{field}) برابر (٥٦~٢٤) و نفوذ استاندارد تصحیح شده (N_{60}) برابر (٢٨~٩) به‌دست آمده و نشان‌گر نمونه‌های با فشردگی کم تا بسیار فشرده است.

بین خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک‌های رسی و عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده هم‌بستگی کافی وجود دارد. بزرگ‌ترین هم‌بستگی مثبت با روش رتبه‌بندی اسپیرمن مربوط به شاخص استحکام برابر ٠/٧٧٢، تنش مؤثر قائم (٠/٦٥٤)، فعالیت خاک (٠/٦٢٦) و وزن مخصوص خشک ٠/٥٨٨ است. بزرگ‌ترین هم‌بستگی منفی نیز به درصد رطوبت برابر ٠/٧٥٩، تخلخل ٠/٥٦٤– و درصد ذرات عبوری از الک ٢٠٠ برابر با ٠/٥٣٩– مربوط است.

از صحت‌سنجی هشت رابطهٔ تجربی موجود به‌منظور برآورد عدد نفوذ استاندارد با داده‌های این تحقیق مربوط به نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی ١٠٧ نمونه از خاک‌های مارنی رسی تبریز نتیجه می‌شود روابط بر اساس شاخص استحکام (Eq.4)، فعالیت و درصد رطوبت (Eq.5) و شاخص استحکام و درصد ریزدانه (Eq.7) بهترین ضرایب آماری را دارند. رابطهٔ تجربی بر اساس عمق نمونه (Eq.8) ضعیف‌ترین ضرایب آماری را نتیجه می‌دهد.

شش رابطهٔ یک‌متغیره و دو رابطهٔ دومتغیره با انجام تحلیل رگرسیون خطی و غیرخطی به‌منظور برآورد خصوصیات فیزیکی و خمیری به‌ترتیب شامل فعالیت، درصد رطوبت، درصد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

ریزدانه و شاخص استحکام با استفاده از عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده پیشنهاد شد که از نظر ضرایب آماری مخصوصاً شیب خط رگرسیون و خطای ریشه میانگین مربعات خطا نسبت به روابط تجربی موجود کارایی بهتری دارند. روابط پیشنهادی یک و دومتغیره به‌منظور برآورد شاخص استحکام (روابط Eq.4n,5n) با ضرایب تبیین (R^2) به‌ترتیب برابر با ۰/۶۷۳ و ۰/۶۱۹ و حداقل خطا و شیب خط رگرسیون نزدیک به یک مناسب‌ترین کارایی را دارند. روابط پیشنهادی این تحقیق برای هم‌بستگی تنش مؤثرو عمق نمونه با نفوذ استاندارد تصحیح شده (روابط Eq.7,8) از نظر همهٔ ضرایب آماری مناسب هستند. در هر حال با توجه به سابقهٔ جدید تحقیقات در زمینهٔ موضوع تحقیق حاضر، صحت‌سنجی روابط پیشنهادی برای سایر مناطق توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز برای حمایت‌های مالی صورت گرفته از طرح تحقیقاتی داخلی با عنوان (برآورد نتایج آزمایش مقاومت نفوذ استاندارد با کاربرد خصوصیات فیزیکی و خمیری خاک‌های رسی به‌روش احتمالاتی (مطالعهٔ موردی: خاک‌های چسبنده مارنی تبریز))) تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

1. Schanid F., "Geo-Characterisation and Propertiey of Natural Soils by in Situ Tests", XVI ICSMGE, Osaka, Millpress Vol.1 (2005).

۲. قنبری ع،" کاوش های صحرائی در مهندسی ژئوتکنیک" نشر پژوهشی نوآوران شریف (۱۳۸۸).

3. Kayabaşı A., "Some emprical equations for predicting standard penetration test blow counts in clayey soils: a case study in Mersin, Turkey", Arab J Geosci 8 (2015)7643–7654.

٤. سازمان مدیریت وبرنامه‌ریزی کشور، "دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد درمطالعات ژئوتکنیک"، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها (۱۳۸۰).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

5. ASTM Internationa, "Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils", Designation: D1586-11 (2014).

6. Hooshmand A., Aminfar M. H., Asghari E., Ahmadi H., "Mechanical and Physical Characterization of Tabriz Marls, Iran", Geotechnical Geology Engineering,Vol.30, (2012) 219-232.

۷. عباسی ن.، "ارائه رابطهٔ تجربی جدید برای برآورد قابلیت فشردگی خاک‌های رسی تحکیم نیافته"، نشریه مهندسی عمران فردوسی سال ۲٤ شمارهٔ ۲(۱۳۹۲).

8. Gibbs H. J., Holtz W. G., "Research on determining the density of sands by spoon penetration testing", In Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics, London, 1 (1957) 35-39.

9. Lacroix Yves, Horn Harry, "Direct determination and indirect evaluation of relative density and its use on earthwork construction projects: in evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils", ASTM Special Technical Publication 523 (1973) 251-280.

10. Skempton A. W. "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation", Geotechnique 36(3) (1986) 425-447.

11. Anbazhagan P., Parihar A., Rashmi H. N., "Review of correlations between SPTN and shear modulus: A new correlation applicable to any region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 36 (2012) 52-69.

12. Seed H. B., Idriss I. M., "Evaluation of liquefaction potentials and deposits based on observation of performance in previous earthquakes", Preprint 81-544, in situ testing to evaluate liquefaction susceptibility, ASCE National Convention, Missouri (1981) 481-544.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

13. Lee S. H. H., "Regression models of shear wave velocities", J. China Inst. Eng. (1990) 519-532.

14. Chatterjee K, Deepankar C.و "Variations in shear wave velocity and soil site class in Kolkata city using regression and sensitivity analysis", Nat Hazards 69 (2013) 2057-2082.

15. Kayabaşı A., "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 (2012) 2171-2183.

16. Akca N., "Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates", Eng Geol 67 (2003) 219-231.

17. Topsakal E., Topal T., "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 (2014).

18. Stalin V. K., Vurukan Arun B. R., "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 (2014).

19. Jafarian Y., Sadeghi Abdollahi A., Vakili R., Baziar M. H. "Probabilistic correlation between laboratory and field liquefaction potentials using relative state parameter index (ζ_R)", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30, (2010) 1061-1072.

20. Kalantary F., Ardalan H., Nariman-Zadeh N., "An investigation on the Su–NSPT correlation using GMDH type neural networks and genetic algorithms", Engineering Geology 104 (2009) 144-155.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.485]

21. Yılmaz I. ,Erzin Y "On the Reliability of SPT-N value as an Indication of Consistency of Clayey Soils", EJGE. (2004) 1-12.

22. Sadrkarimi J., Akbarzad M., "Comparative Study of Methods of Determination of Coefficient of Subgrade Reaction", EJGE. (2009) 1-13.

۲۳. صدرکریمی ج.، ذکری ا. ،"رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه بر اساس مدل های ویسکو الاستیک"، مجلهٔ دانشکدهٔ فنی ، جلد ۳۳ شمارهٔ ۳ (مهندسی عمران) (۱۳۸۵)

24. Sadrkarimi J., Zekri A., Majidpour H., "Geotechnical features of Tabriz Marl " IAEG2006 Paper number 335 (2006).

۲۵. مهندسین مشاور تهران پادیر، " گزارش ژئوتکنیک پروژه ریز پهنه‌بندی لرزه‌ای تبریز" (۱۳۸٦).

۲٦. مهندسین مشاور لرزه زمین‌ساخت، " گزارش ژئوتکنیک پروژه هتل لاله پارک" (۱۳۸٦).

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

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

29. 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).

30. Nourani V., Andalib G., Dąbrowska D., "Conjunction of wavelet transform and SOM-mutual information data pre-processing approach for AI-based multi-station nitrate modeling of watersheds", Journal of Hydrology DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.002 (2017).