

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

پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

تاریخ دریافت ۹۶/۱۱/۰۸

چکیده

آزمون نفوذ استاندارد (SPT) یکی از متداول‌ترین 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. محدوده 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 آزمایشگاهی برای تعیین همه 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، دامنه خمیری، شاخص استحکام، فعالیت، تخلخل اولیه، وزن مخصوص خشک و تنش مؤثر قائم با عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده تعیین شد. ۸ رابطه 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) به دست می‌آید. با استفاده از رگرسیون غیرخطی و بر اساس داده‌های تحقیق حاضر، هشت رابطه 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

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^۱ SPT 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 جامعه مهندسان ژئوتکنیک شناخته شده است. بسیاری از روابط و روش‌های محاسباتی و قضاوت‌های مهندسی ژئوتکنیک به نتیجه این آزمایش وابسته است. به‌منظور انجام این آزمایش نیاز به حفاری گمانه است. با توجه به توسعه 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 محدوده شهر تبریز بررسی شده است. در این تحقیق ضمن ارزیابی نتایج تحقیقات مختلف براساس داده‌های خاک منطقه بررسی شده، مجموعه روابط مناسب‌تری ارائه و

1. Standard Penetration Test

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

مواد و روش‌ها

۱. مرور ادبیات فنی

برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ آقای اتربرگ^۱ 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^۲ SL، حد خمیری^۳ PL و حد روانی^۴ LL هستند که به محدوده تغییرات درصد رطوبت خاک در حالت خمیری اصطلاحاً دامنه خمیری^۵ PI گفته می‌شود و از تفاضل حد روانی و حد خمیری به دست 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 صحرایی محسوب می‌شود. روش آزمایش برای اولین بار در سال ۱۹۵۸ به وسیله استاندارد^۶ ASTM 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 شماره استاندارد ۱۸۲-الف در سال ۱۳۷۹ با عنوان "دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)" به وسیله استاندارد مهندسی آب کشور وابسته به وزارت نیرو تدوین شده است [۴]. آزمایش نفوذ استاندارد، نفوذ یک نمونه‌گیر در داخل خاک به منظور تهیه 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 140 ± 2 پوند معادل 623 ± 9 نیوتن یا $63/5$ کیلوگرم از ارتفاع 30 ± 1 اینچ معادل 0.76 ± 0.03

1. Eterberg, 1965

2. Shrinkage Limit

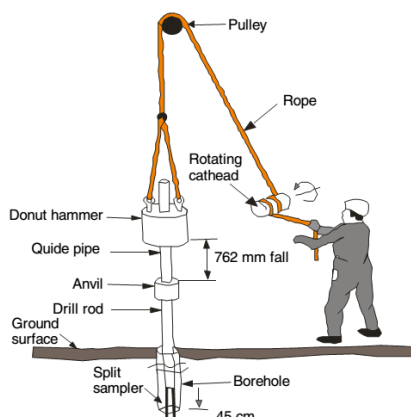
3. Plasticity Limit

4. Liquid Limit

5. Plastic Index

6. American Standard Testing of Material

متر به صورت آزاد به همراه 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 سانتی‌متری‌های دوم و سوم به دست می‌آید [۵]. روش انجام آزمایش SPT بروش دستی در شکل ۱ ارائه شده است.



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

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

$$(N_1)_{60} = N \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (1)$$

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 رابطه (۲) است [۶].

$$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5} \quad (2)$$

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

1. National Center for Earthquake Engineering Research

جدول ۱. ضرایب اصلاحی روش NCEER-97 [۶]

عامل	متغیر تجهیزات	ضریب	همبستگی
فشار سربار		C_N	$(Pa / \sigma'_{vo})^{0.5}$
			$C_N < 2$
نسبت انرژی	چکش دونات	C_E	۰/۵-۱/۰
	چکش ایمن		۰/۷-۱/۲
	چکش اتوماتیک		۰/۸-۱/۳
قطر گمانه	۶۵-۱۱۵ میلی‌متر	C_B	۱/۰
	۱۵۰ میلی‌متر		۱/۰۵
	۲۰۰ میلی‌متر		۱/۱۵
طول میله حفاری	۳-۴ متر	C_R	۰/۷۵
	۴-۶ متر		۰/۸۵
	۶-۱۰ متر		۰/۹۵
	۱۰-۳۰ متر		۱/۰
	> ۳۰ متر		< ۱/۰
روش نمونه‌گیری	نمونه گیر استاندارد	C_S	۱/۰
	نمونه گیر بدون پوشش		۱/۱-۱/۳

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 C_c 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^۱ و پیک^۳ (۱۹۶۷) و کاپولا^۴ (۱۹۸۱) و مینی^۵ (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

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

$$C_c = 0.009(LL-10) \quad (۳)$$

$$C_c = 0.009w_n + 0.005LL \quad (۴)$$

$$C_c = (LL-13)/109 \quad (۵)$$

۲. پیشینه تحقیق

پیشینه تحقیق در خصوص آزمایش نفوذ استاندارد با توجه به کاربرد وسیع این آزمایش در تحقیقات و حتی در پروژه‌های اجرایی 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، به دلیل اثرات عوامل مختلف بر نتایج آزمایش، اصلاحات مختلف برای نتایج آن ارائه شده است. اصلاح نتایج آزمایش نفوذ استاندارد به دلیل تأثیر فشار سربار و هم‌چنین تأثیر مجاورت طول میله حفاری با جداره گمانه به وسیله گیبس^۱ و همکاران (۱۹۵۷) ارائه شد [۸]. لاکرویکس^۲ و همکاران برای ارتباط مقاومت نفوذ غیراستاندارد با حالت استاندارد، ضریب اصلاحی پیشنهاد کردند [۹]. سکمپتن^۳ تعداد ضربات اصلاح شده (N_{60}) برای نفوذ استاندارد را با توجه به روش صحرایی و تجهیزات، اثر راندمان چکش، گمانه، طول میله حفاری و مغزه‌گیری ارائه کرد [۱۰]. در بیش‌تر تحقیقات، اصلاحات نتایج آزمایش نفوذ استاندارد به عمل آمده براساس گزارش سال ۱۹۹۷ مؤسسه **NCEER** انجام می‌شود [۶].

برای اولین بار استفاده از نتایج آزمایش **SPT** به وسیله ترزاقی و پیک (۱۹۴۸) به منظور 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]، [۱۴]. تعداد زیادی از روابط تجربی برای ارتباط بین نتایج ضربات نفوذ استاندارد و سایر پارامترهای آزمایش‌های محلی وجود دارد که به عنوان نمونه در خصوص ارتباط بین نتایج

-
1. Gibbs
 2. Lacroix
 3. Skempton

نفوذ استاندارد و پرسیمتری می‌توان به تحقیقات کیاباسی^۱ (۲۰۱۲) اشاره کرد [۱۵]. در باره ارتباط بین نتایج آزمایش نفوذ مخروط و ضربات نفوذ استاندارد تحقیقاتی بر خاک‌های مختلف ماسه‌ای، سیلتی و رسی موجود است [۱۶]. نفوذ استاندارد به‌طور گسترده در تحقیقات ژئوتکنیکی نیز استفاده می‌شود. تاپسکال^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۴ پایداری یک شیب را با برنامه‌ریزی و انجام آزمایش نفوذ استاندارد در داخل گمانه‌هایی در یک لغزش دوباره فعال شده بررسی کردند. طبق نتایج جالب این تحقیق، بین سطح لغزش و مقادیر نفوذ استاندارد رابطه وجود دارد به‌نحوی که در نزدیکی سطح گسیختگی مقادیر نفوذ استاندارد کاهش می‌یابد [۱۷]. استیلن^۳ و همکاران (۲۰۱۴) کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد برای سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌منظور توسعه نقشه پهنه‌بندی خاک را بررسی کردند [۱۸]. در خصوص ارتباط بین نتایج نفوذ استاندارد به‌منظور ارزیابی پدیده 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 منطقه تبریز به رنگ‌های زرد، سبز و خاکستری/سبز یافت می‌شوند. در جدول ۳ خلاصه خصوصیات خمیری نمونه‌های مارن تبریز و در جدول ۴ خلاصه‌ای از نتایج نفوذ استاندارد این لایه‌ها که بر اساس روش **NCEER, 1997** اصلاح شده‌اند، ارائه شده است. هم‌چنین رابطه (۶) برای برآورد نفوذ استاندارد بر اساس عمق نمونه پیشنهاد شده است [۶].

-
1. Kayabaşı
 2. Topsakal
 3. Stalin

$$N=1.2177 D + 31.012 \quad (6)$$

جدول ۲. روابط تجربی پیشنهادی Kayabaş [۳]

متغیر وابسته	متغیر مستقل	رابطه پیش‌بینی N_{60}	R^2	n
N_{60}	Ac	$N_{60} = 7.92 \ln(\text{Ac}) + 24.7$	۰/۶۲	۲۲۰
N_{60}	w	$N_{60} = -0.52(w) + 31.20$	۰/۵۶	۲۲۰
N_{60}	FGP	$N_{60} = -0.21(\text{FGP}) + 31.03$	۰/۵۲	۲۲۰
N_{60}	Ic	$N_{60} = 9.1166 e^{0.537(Ic)}$	۰/۵۱	۲۲۰
N_{60}	Ac	$N_{60} = 5.55 \ln(\text{Ac}) - 0.32(w) + 31.7$	۰/۷۸	۲۲۰
N_{60}	W,FGP	$N_{60} = -0.344(w) - 0.122(\text{FGP}) + 34.879$	۰/۶۹	۲۲۰
N_{60}	FGP,Ic	$N_{60} = 2559 e^{0.002(Ic)} - 0.147(\text{FGP}) - 2539$	۰/۷۳	۲۲۰

جدول ۳. خلاصه خصوصیات مارن تبریز [۶]

نوع مارن	طبقه بندی USCS	LL(%)	PI(%)	رطوبت (درصد)	تخلخل	دانسیته (kg/cm^3)	فشار تورم (kg/cm^3)
زرد	CL-CH	۵۵-۷۵	۳۰-۳۵	۲۵	-۰/۹۵ ۰/۷۵	۱/۷۰	۱-۲
سبز	CL-CH	۵۰-۶۵	۲۰-۲۵	۲۰	-۰/۸۵ ۰/۶۵	۱/۸۰	۱-۲
خاکستری / سیاه	CL-CH, MH	۴۰-۶۰	۱۵-۲۰	۱۵	-۰/۷۰ ۰/۵۰	۱/۹۰	۰/۵-۱/۵

جدول ۴. خلاصه نتایج نفوذ استاندارد نمونه‌های مارن تبریز [۶]

نوع مارن	N_{spt}
زرد	۱۰-۵۰
سبز	۴۰-۶۰
خاکستری / سیاه	۴۰-۸۰

یلماز^۱ و همکاران (۲۰۰۴) 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

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 منطقه 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 و گسلش 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 [۶]. از این‌رو، ژئومورفولوژی منطقه تحقیق حاصل تأثیر نیروهای تکتونیکی، فعالیت گسل‌ها، چین‌ها و فرسایش است. فرسایش و رسوب‌گذاری به‌وسیله 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 و شمال 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 [۶]، [۲۲]، [۲۳]) روی آن‌ها انجام شده است. در شکل ۳ نمونه‌هایی از مشکلات سازه‌های احداث شده در این مناطق ارائه شده است [۲۴].



شکل ۲. برونزد لایه‌های ماری در محدوده شمال شرق شهر تبریز (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

۴. 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]، [۲۶] بررسی و استفاده شد. دو گمانه ماشینی نیز به‌روش دورانی به قطر تا ۴ اینچ در محدوده تحقیق حفاری شده و آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی انجام شد. آزمایش نفوذ استاندارد طبق استاندارد ASTM 1586-11 [۵] از هر عمق حدود یک متری انجام شد. روی ۱۴ نمونه 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 و حدود 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 ۴ به‌همراه گمانه‌های موجود در منطقه نشان داده شده است. در گمانه 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 گمانه 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 گمانه B2 را نشان می‌دهد.

نتایج و تفسیر داده‌ها

در مجموع ۱۰۷ سری از نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام یافته بر ۱۴ 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



شکل ۴. موقعیت گمانه‌های تحقیق بر تصویر هوایی 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_0)، تنش مؤثر قائم در جا (σ'_v) در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش نفوذ استاندارد انجام شده از هر یک متر در

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

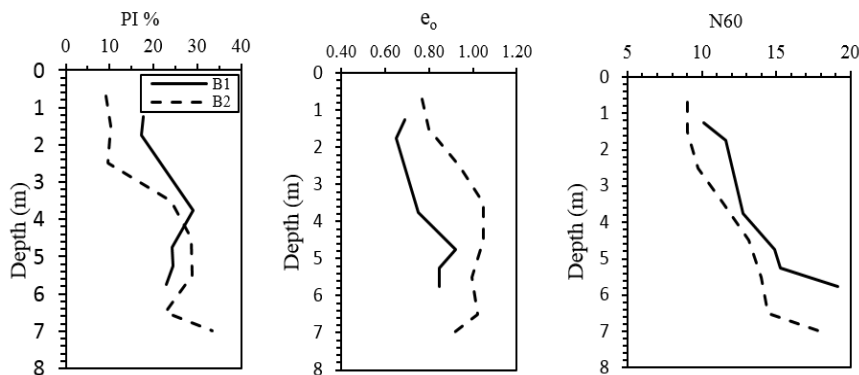
گمانه‌های حفر شده، بر اساس روش NCEER,97 تصحیح شده است. به‌عنوان نمونه در شکل ۶، تغییرات متغیرهای PI , e_0 , N_{60} نسبت به عمق در دو گمانه تحقیق ترسیم شده است. توصیف آماری کل ۱۰۷ سری داده تحقیق به‌وسیله نرم‌افزار (SPSS,16) طبق جدول ۵ ارائه شده است. شاخص استحکام (CI) مقدار کم‌تری داشته و حالت نمونه‌های مأخوذه عمدتاً در محدوده خمیری هستند.

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

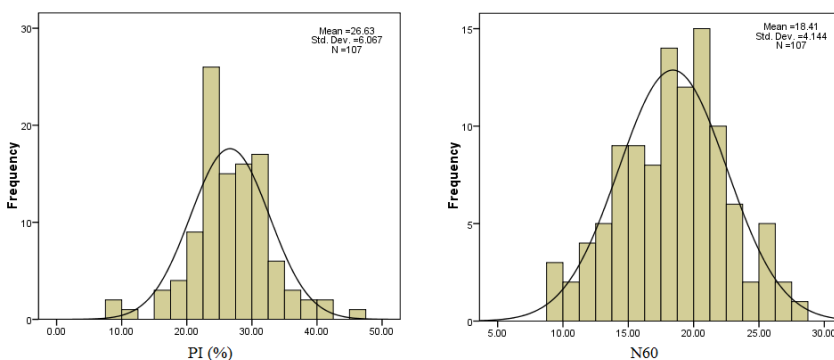
متغیر	انحراف معیار استاندارد میانگین حداکثر حداقل		
درصد ذرات ریزدانه (%)	۸۰/۸۵	۹۸/۷۰	۶۵/۰۰
حد روانی (%)	۵۶/۷۸	۷۷/۰۰	۲۹/۰۰
حد خمیری (%)	۳۰/۱۵	۴۲/۳۹	۱۲/۰۰
درصد ذرات رسی (%)	۴۹/۴۴	۷۰/۰۰	۳۲/۰۰
دامنه خمیری (%)	۲۶/۶۳	۴۵/۰۰	۹/۱۹
شاخص استحکام	۰/۹۸	۱/۶۹	۰/۱۴
فعالیت	۰/۵۵	۰/۹۶	۰/۲۰
وزن مخصوص خشک (gr/cc)	۱/۵۹	۱/۸۵	۱/۲۶
درصد رطوبت طبیعی (%)	۲۶/۶۶	۳۷/۹۴	۱۶/۳۰
تخلخل	۰/۷۲	۱/۱۵	۰/۴۶
تنش موثر قائم (kpa)	۲۶۶/۵۵	۶۱۵/۸۰	۱۶/۸۵
نفوذ استاندارد صحرانی (N)	۳۸/۴۴	۵۶/۰۰	۲۴/۰۰
نفوذ استاندارد اصلاح شده N_{60}	۴/۱۴۴	۱۸/۴۱	۹/۰۰

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

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



شکل ۶. نمودار تغییرات متغیرهای مهم تحقیق نسبت به عمق گمانه‌های حفر شده

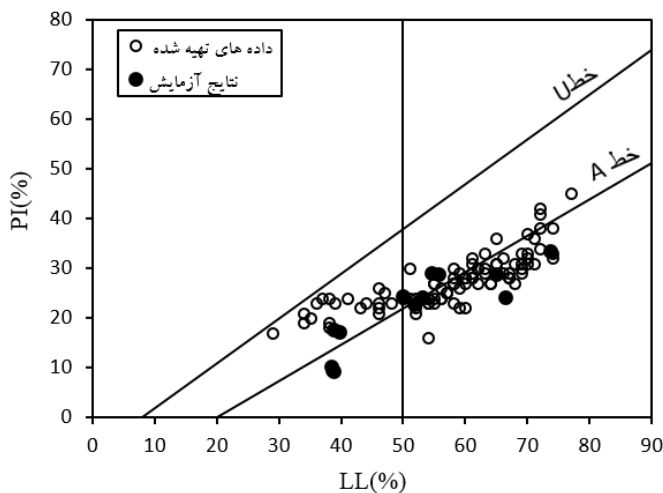


شکل ۷. هیستوگرام توزیع فراوانی دامنه خمیری و عدد نفوذ استاندارد N60

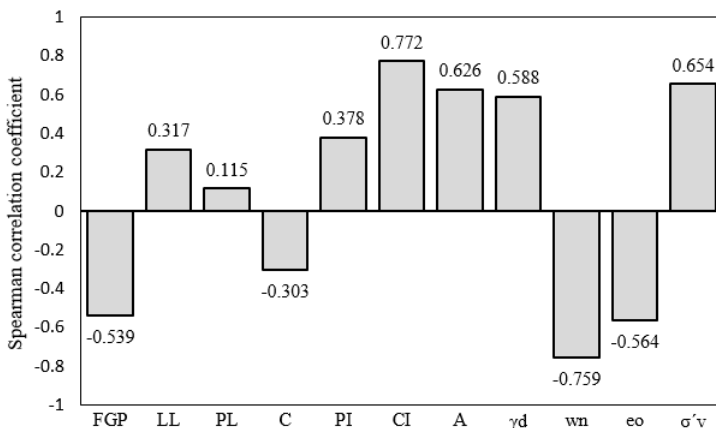
هم‌بستگی بین متغیرهای تحقیق شامل ۱۱ متغیر (LL, PL, PI, C, FGP, e₀, w_n, CI, A,) نسبت به عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده (N₆₀) با استفاده از نرم‌افزار (SPSS, 16) با روش رتبه‌بندی اسپیرمن^۱ تعیین شد. نتیجه بررسی طبق هیستوگرام شکل ۹ ارائه شده است. مقدار ضریب +۱ و -۱ به معنی به ترتیب هم‌بستگی کامل مثبت و منفی بین دو متغیر است. بیش‌ترین هم‌بستگی مثبت به ترتیب مربوط به شاخص استحکام (۰/۷۷۲)، تنش

1. Spearman

مؤثرقائم (۰/۶۵۴)، فعالیت خاک (۰/۶۲۶) و وزن مخصوص خشک (۰/۵۸۸) است. به عبارت دیگر با افزایش در مقدار عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده، افزایش در مقادیر هر یک از این متغیرها انتظار می‌رود. بیش‌ترین هم‌بستگی منفی نیز به ترتیب مربوط به درصد رطوبت (۰/۷۵۹)، تخلخل (۰/۵۶۴) و درصد ذرات عبوری از الک ۲۰۰ (۰/۵۳۹) است. به عبارت 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}

صحت‌سنجی روابط تجربی موجود

طبق سوابق قبلی چنان‌که ذکر شد، هشت رابطه تجربی اخیر در خصوص هم‌بستگی بین عدد نفوذ استاندارد و سایر خصوصیات خاک در نظر گرفته شد. هفت رابطه پیشنهاد شده به وسیله کی‌عباسی [۳] و یک رابطه نیز بر اساس نتایج آزمایش‌ها روی نمونه‌های مارن تبریز به وسیله هوشمند و همکاران [۶] 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 R^2 به ترتیب طبق روابط (۴) و (۵) [۳۰] و شیب خط رگرسیون (CR^3) در جدول ۶ ارائه شده است. در این روابط پارامترهای X_{pi} ، X_{mi} به ترتیب مقادیر متغیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و X_{ave} میانگین متغیر اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌ها است

$$RMSE = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{pi})^2}{n}} \right) / X_{ave} \quad (7)$$

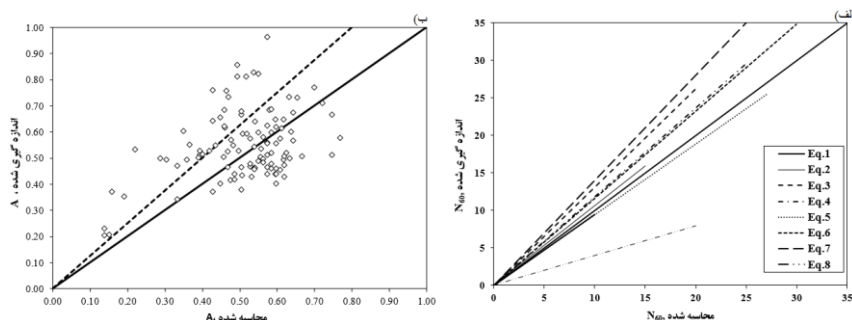
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{mi} - X_{ave})^2} \quad (8)$$

جدول ۶. ارزیابی روابط تجربی موجود برای داده‌های تحقیق حاضر ($n=107$)

ردیف (Eq.)	مرجع	رابطه	RMSE	R^2	CR
۱	کی‌عباسی (۲۰۱۵) [۳]	$N_{60} = 7.92 \ln(A) + 24.70$	۰,۱۷۹	۰,۴۴۴	۰,۹۴۰
۲		$N_{60} = -0.52 w_n + 31.2$	۰,۱۶۵	۰,۵۲۵	۱,۰۶۲
۳		$N_{60} = 0.21 FGP + 31.03$	۰,۳۰۲	۰,۳۰۸	۱,۳۰۹
۴		$N_{60} = 9.1166 \text{Exp}(0.537CI)$	۰,۲۰۷	۰,۶۲۹	۱,۱۸۰
۵		$N_{60} = 5.55 \ln(A) - 0.32 w_n + 31.7$	۰,۱۴۷	۰,۶۵۰	۰,۹۴۲
۶		$N_{60} = -0.344 w_n - 0.122 FGP + 34.879$	۰,۲۰۹	۰,۵۲۴	۱,۱۶۱
۷		$N_{60} = 2559 \text{Exp}(0.002 CI) - 0.147 FGP - 2539$	۰,۳۱۹	۰,۶۶۵	۱,۴۰۲
۸	هوشمند و همکاران (۲۰۱۲)	$N_{60} = 1.12(D + 25.5)$	۱,۵۴۲	۰,۳۴۰	۰,۳۹۷

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

طبق جدول ۶ بزرگ‌ترین ضریب تبیین با کم‌ترین خطا مربوط به روابط ۲، ۴، 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 رابطه 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 ۲، ۴، 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 رابطه (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.

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

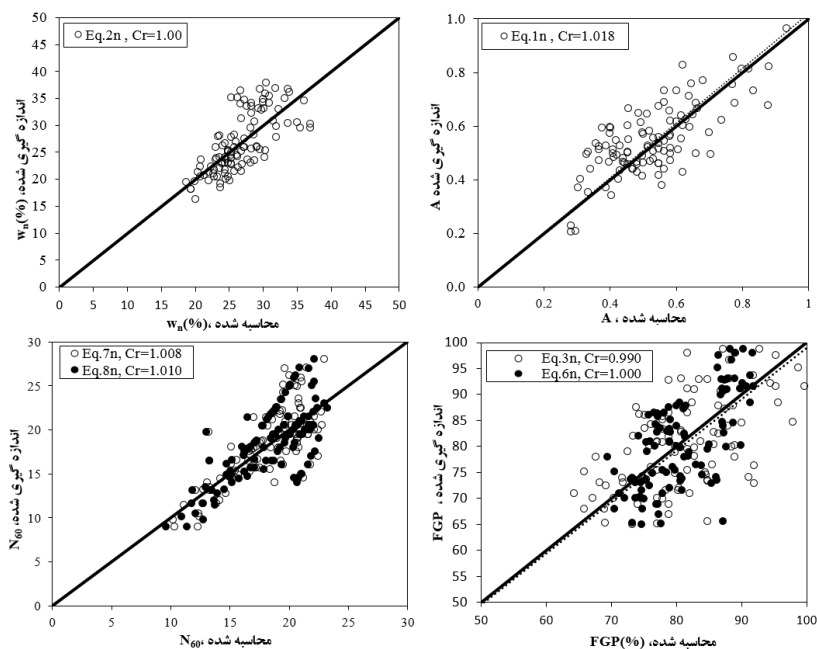
متغیر	خطی (Linear)	(Exponential)	نمایی (Power)	لگاریتمی (Logarithmic)
فعالیت (A)	۰/۵۰۶	۰/۵۲۲	۰/۵۲۱	۰/۴۹۷
درصد رطوبت (w_n)	۰/۵۲۵	۰/۵۵۲	۰/۵۰۷	۰/۴۸۷
شاخص استحکام (CI)	۰/۵۶۲	۰/۶۳۸	۰/۵۹۲	۰/۶۱۳
درصد ریزدانه (FGP)	۰/۳۰۸	۰/۳۰۹	۰/۲۹۱	۰/۲۹۴
عمق نمونه (D)	۰/۴۵۲	۰/۵۶۴	۰/۶۲۵	۰/۴۵۵
تنش موثر قائم (σ'_v)	۰/۴۳۲	۰/۵۵۲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

علاوه بر بررسی شش رابطه 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 ذرات ریزدانه 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 رابطه پیشنهادی در این تحقیق به‌همراه نتایج ارزیابی آماری آن‌ها در جدول ۸ خلاصه شده است.

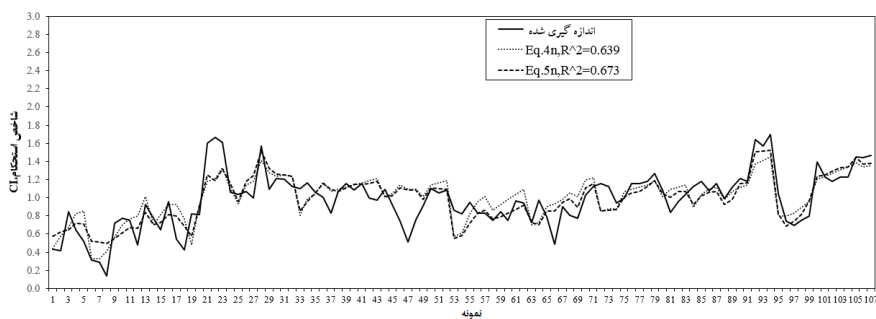
جدول ۸. ارزیابی روابط تجربی پیشنهادی برای داده‌های تحقیق حاضر (n=107)

ردیف (Eq.)	رابطه	RMSE	R ^۲	CR
1n	$A = 0.160 e^{0.063N_{60}}$	۰/۱۸۳	۰/۵۲۱	۰/۹۵۲
2n	$w_n = 51.112 e^{-0.036 N_{60}}$	۰/۱۴۳	۰/۵۲۶	۱/۰۰۰
3n	$FGP = 125.939 e^{-0.024 N_{60}}$	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	$N_{60} = 5.417 \sigma'_v{}^{0.225}$	۰/۱۵۵	۰/۶۱۷	۱/۰۰۸
8n	$N_{60} = 10.378 D^{0.223}$	۰/۱۵۰	۰/۶۲۵	۱/۰۱۰

در بین روابط یک متغیره، رابطه لگاریتمی Eq.4n بزرگترین ضریب تبیین R^2 و کمترین خطای RMSE در برآورد شاخص استحکام (CI) براساس نفوذ استاندارد تصحیح شده N_{60} داشته و به ترتیب برابر $0/639$ و $0/193$ را نتیجه داده است. در بین روابط دو متغیره نیز مناسبترین رابطه، Eq.5n برحسب درصد رطوبت و نفوذ استاندارد تصحیح شده به منظور ارزیابی شاخص استحکام است. در شکل ۱۱ کارایی همه روابط پیشنهادی به منظور برآورد فعالیت، درصد رطوبت، شاخص استحکام و درصد ریزدانه با استفاده از نفوذ استاندارد تصحیح شده ارائه شده است. هم چنین رابطه هم بستگی نفوذ استاندارد تصحیح شده با تنش مؤثر قائم و عمق به ترتیب با روابط Eq. ۷، ۸ در این شکل نشان داده شده است. مقایسه نتایج برآورد مناسبترین روابط یک و دو متغیره ۴، ۵ طبق شکل ۱۲ است. به طور کلی کارایی روابط چندمتغیره بهتر از روابط یک متغیره است ولی برای استفاده از روابط چندمتغیره لازم است متغیرهای بیش تری از خاک تعیین شود.

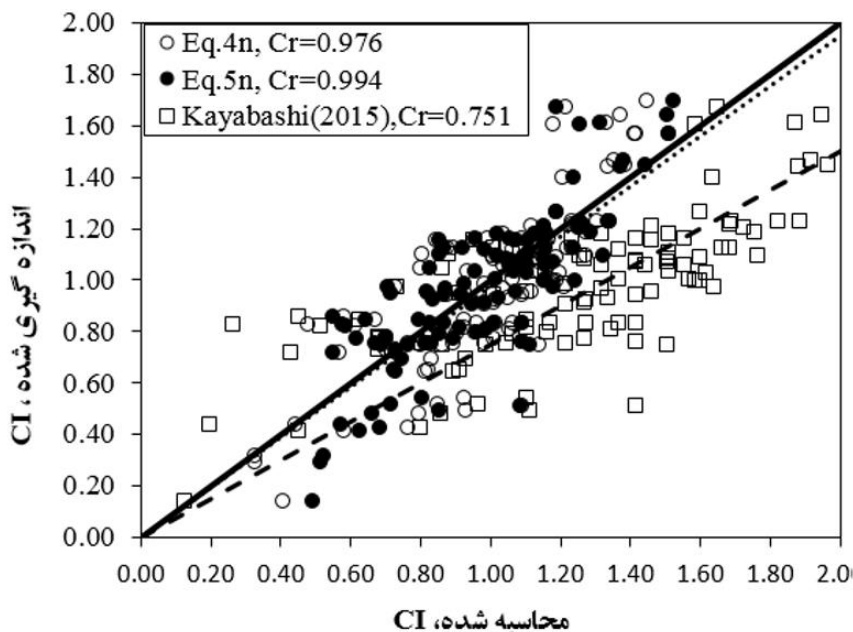


شکل ۱۱. کارایی روابط پیشنهادی این تحقیق به منظور برآورد خصوصیات فیزیکی و خمیری

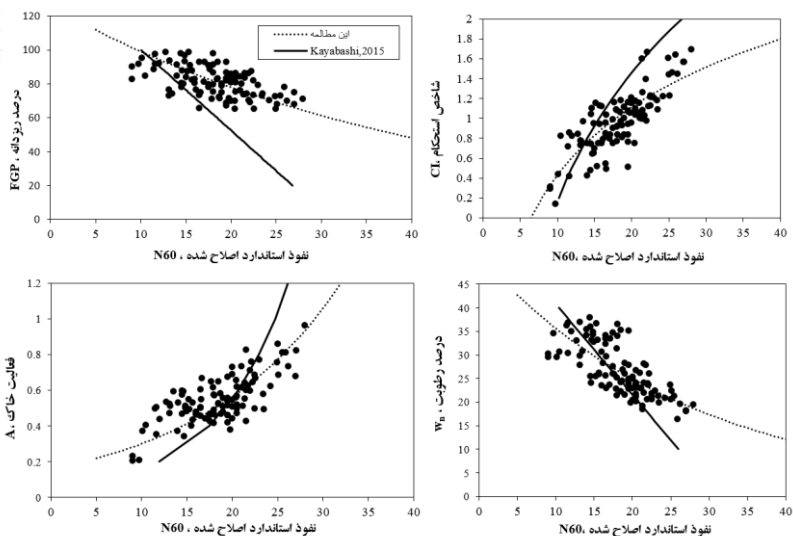


شکل ۱۲. پیش بینی مناسب ترین رابطه پیشنهادی به منظور محاسبه شاخص استحکام (CI) از مقایسه ضرایب آماری روابط پیشنهادی در این تحقیق با نتایج روابط موجود طبق جدول ۹، مشاهده می شود روابط پیشنهادی مخصوصاً روابط Eq.4n,5n از نقطه نظر شیب خط رگرسیون، خطا و ضریب تبیین در مقایسه با روابط موجود کارایی بهتری دارند. این موضوع به وضوح با مقایسه کارایی رابطه موجود (Eq.4) و روابط پیشنهادی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین رابطه خطی موجود Eq.8 با داده های این تحقیق عملاً ارزیابی ضعیف داشته است و در این خصوص رابطه Eq.8n به صورت نمایی پیشنهاد شده است. رابطه هم بستگی مناسب بین تنش مؤثر قائم و نفوذ استاندارد تصحیح شده در جدول ۹. مقایسه کارایی مناسب ترین روابط موجود با روابط پیشنهادی (n=107)

ردیف (Eq.)	مرجع	رابطه	RMSE	R ^۲	CR
4		$N_{60}=9.1166 \text{ Exp}(0.537CI)$	۰/۲۰۷	۰/۶۲۹	۱/۱۸۰
5	A.Kayabasi, (2015)[3]	$N_{60}=5.55 \ln(A)-0.32 w_n+31.7$	۰/۱۴۷	۰/۶۵۰	۰/۹۴۲
7		$N_{60}=2559 \text{ Exp}(0.002 CI)-0.147 \text{ FGP}-2539$	۰/۳۱۹	۰/۶۶۵	۱/۴۰۲
8	A. Hooshmand et al. (2012)[6]	$N_{60}=1.12(D+25.5)$	۱/۵۴۲	۰/۳۴۰	۰/۳۹۷
4n	این تحقیق	$CI=0.988 \ln(N_{60})-1.844$	۰/۱۹۳	۰/۶۱۹	۰/۹۷۷
5n		$CI=-0.4 \ln(w_n)+0.044 N_{60}+1.481$	۰/۱۲۹	۰/۶۷۳	۱/۰۶۹
7n		$N_{60}=5.417 \sigma_v^{0.225}$	۰/۱۵۵	۰/۶۱۷	۱/۰۰۹
8n		$N_{60}=10.378 D^{0.223}$	۰/۱۵۰	۰/۶۲۵	۱/۰۱۰



شکل ۱۳. مقایسه کارایی روابط پیشنهادی و موجود به منظور برآورد شاخص استحکام (CI)



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

خاک‌های رسی تبریز نیز طبق رابطه 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 ۱۴ خلاصه شده است.

نتایج

خاک‌های رسی منطقه تحقیق واقع در شهر تبریز، بر اساس طبقه‌بندی USCS عمدتاً در رده CH, MH, CL, ML قرار می‌گیرند. این خاک‌ها شامل انواع مارن‌های به‌رنگ زرد، زیتونی و خاکستری و خاک‌های رسی-سیلتی با دامنه خمیری اندک تا قابل توجه در محدوده تغییرات (۴۵%~۹/۱۹) و حد روانی در محدوده (۷۷%~۲۹) را شامل می‌شوند. محدوده تغییرات نفوذ استاندارد صحرایی (N_{field}) برابر (۵۶~۲۴) و نفوذ استاندارد تصحیح شده (N_{60}) برابر (۲۸~۹) 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 ۰/۷۷۲، تنش مؤثر قائم (۰/۶۵۴)، فعالیت خاک (۰/۶۲۶) و وزن مخصوص خشک ۰/۵۸۸ است. بزرگ‌ترین هم‌بستگی منفی نیز به درصد رطوبت برابر ۰/۷۵۹، تخلخل ۰/۵۶۴- و درصد ذرات عبوری از الک ۲۰۰ برابر با ۰/۵۳۹- مربوط است.

از صحت‌سنجی هشت رابطه تجربی موجود به‌منظور برآورد عدد نفوذ استاندارد با داده‌های این تحقیق مربوط به نتایج آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی ۱۰۷ 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. رابطه تجربی بر اساس عمق نمونه (Eq.8) ضعیف‌ترین ضرایب آماری را نتیجه می‌دهد.

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

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 به منظور برآورد شاخص استحکام (روابط Eq.4n,5n) با ضرایب تبیین (R^2) به ترتیب 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 مؤثر و عمق نمونه با نفوذ استاندارد تصحیح شده (روابط Eq.7,8) از نظر همه ضرایب آماری مناسب هستند. در هر حال با توجه به سابقه جدید تحقیقات در زمینه 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 به روش احتمالاتی (مطالعه 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.
۴. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، "دستورالعمل آزمایش نفوذ استاندارد در مطالعات ژئوتکنیک"، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها (۱۳۸۰).

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 رابطه تجربی جدید برای برآورد قابلیت فشرده‌گی خاک‌های رسی تحکیم نیافته"، *نشریه مهندسی عمران فردوسی* سال ۲۴ شماره 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.

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.

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"، مجله دانشکده فنی، جلد ۳۳ شماره 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" (۱۳۸۶).
۲۶. مهندسین مشاور لرزه زمین‌ساخت، "گزارش ژئوتکنیک پروژه هتل لاله پارک" (۱۳۸۶).
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).