

کاربرد عملی نتایج CPT در ارزیابی نشست پی‌ها

مینا ملک‌دوست پیشکناری (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

ابوالفضل اسلامی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران: شریف
دوری ۲-۲۷، شماره ۱، ص. ۸۵-۷۵

در این نوشتار به منظور برآورد تغییرات سختی خاک در قالب E از داده‌های آزمایش نفوذ مخروط (CPT) استفاده شده که پروفیل پیوسته در خاک زیر پی، به خصوص خاک‌های نرم و شل که معضلات نشست درمورد آنها جدی است، را فراهم می‌کند. برای یکنواختی در محاسبات نشست از روابط اصلاح شده تنش-کرنش جانبو (۱۹۶۷) با تغییرات پیشنهادی در توان تنش (m) و مدول سختی (z) استفاده شده که براساس چارت‌های طبقه‌بندی رفتاری خاک و داده‌های مقاومت نوک مخروط (q_c)، اصطکاک چداری (f_s) و فشار آب حفریه (u) ناشی از آزمایش CPT و $CPTu$ اصلاح شده‌اند. برای ارزیابی دقیق‌تر رابطه پیشنهادی، یک بانک اطلاعاتی شامل ۵۲ مورد عملی متشکل از نتایج آزمایش بارگذاری پی‌ها به همراه داده‌های آزمایش CPT جمع‌آوری شد. نتایج حاصل از مقایسه‌ها به کمک روش‌های آماری و احتمال و با استفاده از روابط جانبو، مایهوف و اشمرتمن نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی برای برآورد نشست بر پایه رابطه اصلاح شده جانبو و نیز استفاده از داده‌های پیوسته CPT به میزان قابل توجهی توانسته مقادیر نشست را نسبت به روش‌های متداول دیگر با دقت بیشتر و پراکندگی کم‌تر پیش‌بینی کند.

واژگان کلیدی: آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، نشست، تنش-کرنش، مدول سختی، طبقه‌بندی رفتاری خاک، موارد عملی.

mmalekdoost@yahoo.com
afeslami@aut.ac.ir

۱. مقدمه

برای تعیین نشست پی‌ها، از روش‌ها و روابط بسیاری می‌توان بهره جست که در بیشتر آن‌ها عواملی چون سختی خاک (E)، عرض پی (B)، فشار وارد از پی بر زمین (q) و گسترش آن در عمق تعیین‌کننده و مؤثرند. در تمامی روابط ارائه شده «نشست آبی» و «نشست تحکیمی» از یکدیگر جدا شده‌اند؛ به عبارت دیگر پاره‌یی از روابط میزان نشست پی‌ها را روی خاک‌های دانه‌بی (نشست آبی) و تعدادی دیگر میزان نشست آن‌ها را روی خاک‌های چسبیده (نشست تحکیمی) بررسی می‌کنند. بنابراین در منابع ژئوتکنیک به ندرت رابطه‌یی واحد برای یافتن نشست، به طوری که بتواند در تمامی خاک‌ها صادق باشد، یافت می‌شود. در روابط موجود، خاک‌ها در دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱. خاک‌های دانه‌بی با قابلیت زهکشی سریع که در آنها بلافاصله پس از بارگذاری نشست رخ خواهد داد؛ ۲. خاک‌های چسبیده که در آنها تغییرات حجمی بر اثر افزایش تنش مؤثر سربار، در درازمدت اتفاق خواهد افتاد. بنابراین اولین گام در تعیین نشست حاصل از بار یک پی، مشخص کردن نوع خاک در منطقه تأثیر سربار است. با توجه به تغییر جنس لایه‌های خاک در عمق، یکی از مشکلات عمده در پیش‌بینی نشست‌های احتمالی، تعیین دقیق نوع خاک در هر لایه و در نهایت استفاده از روابط مربوط به آن نوع خاک است. با وجود نمونه‌گیری از خاک در فواصل زیاد، احتمال وجود خطا در این‌گونه محاسبات افزایش

می‌یابد. در تمام روابط موجود پارامترهایی که نمادی از سختی خاک هستند - نظیر E (سختی خاک)، M (مدول محصور شده) و m_v (ضریب تغییر حجم) - در محدوده‌ی مورد بررسی که گاهی بسته به عرض پی می‌تواند عمق قابل ملاحظه‌یی را شامل شود، توسط یک عدد کلی و به صورت میانگین در محاسبات نشست اعمال می‌شود. این در حالی است که بدون حتی تغییر جنس لایه‌ی خاک و با پیشروی در عمق، سختی خاک به تدریج افزایش خواهد یافت. بنابراین استفاده از یک عدد به صورت میانگین سختی خاک در عمق چند متر می‌تواند نتیجه را از مقدار واقعی دور کند.^[۱]

دلیل در نظر گرفتن یک عدد به صورت میانگین برای E یا m_v در روابط این است که اندازه‌گیری سختی خاک در فواصل کوتاه و با دقت بالا کار دشواری است. به همین لحاظ برای عدد سختی خاک نهایتاً از میانگین‌گیری دو یا سه مقدار E یا m_v در عمق تأثیر ناشی از بار پی استفاده می‌شود. مهم‌ترین گام در یافتن رابطه‌یی مناسب برای تخمین نشست، یافتن سختی معادل خاک به طور دقیق است. هرچه سختی خاک دقیق‌تر اندازه‌گیری شود، پیش‌بینی صورت‌گرفته به رفتار واقعی نزدیک‌تر خواهد بود. درمورد پروفیل خاک‌هایی که در آنها لایه‌ها در فواصل کوتاه تغییر می‌کنند باید تک‌تک لایه‌ها مقدار سختی را یافت و برای محاسبه‌ی نشست هر لایه از سختی همان لایه استفاده کرد. از میان روش‌های موجود برای تعیین مدول تنش-کرنش، روابط تجربی و نیز نتایج آزمایش‌های درجای SPT (آزمایش

تاریخ: دریافت ۱۰/۱۰/۱۳۸۷، اصلاحیه ۱۳/۴/۱۳۸۸، پذیرش ۱۸/۵/۱۳۸۹.

که در آن u_0 نماینده‌ی فشار آب حفره‌ی در حالت سکون و u_2 فشار آب حفره‌ی پشت مخروط است. بر این اساس، نسبت فشار پیش‌تحکیمی مطابق رابطه‌ی ۴ به‌دست می‌آید.

$$OCR = 0.66 + 1.43 (PPD) \quad (4)$$

۲.۲. مدول محصور شده

بیشتر رابطه‌های بین نتایج CPT و مدول محصور شده (M)، مربوط به خط مماس مدول است. مقدار مرجع M ، که به‌طور معمول و براساس تنش مؤثر قائم، قبل از شروع آزمایش درجا است M_0 نامیده می‌شود. برای ماسه‌های لای‌دار سمنته‌نشده و عادی تحکیم‌یافته، محاسبه‌ی M_0 با استفاده از روابط ۵ پیشنهاد می‌شود.^[۶]

$$M_0 = 4q_c \quad \text{برای} \quad q_c < 10 \text{ MPa}$$

$$M_0 = 2q_c + 20 \text{ (MPa)} \quad \text{برای} \quad 10 \text{ MPa} < q_c < 50 \text{ MPa}$$

$$M_0 = 120 \text{ MPa} \quad \text{برای} \quad q_c > 50 \text{ MPa} \quad (5)$$

که در آن q_c مقاومت نوک مخروط در آزمایش CPT است.

۳.۲. مدول برشی متناظر با کرنش کوچک

در سال ۲۰۰۰، محققین طی تحقیقاتی اعلام کردند بیشینه مدول برشی متناظر با کرنش کوچک با q_c حاصل از آزمایش CPT مرتبط خواهد بود (رابطه‌ی ۶):^[۷]

$$G_{\max} = 49.2 q_c^{0.51} \quad (6)$$

۴.۲. مدول یانگ زه‌کشی نشده

برای محاسبه‌ی مدول یانگ زه‌کشی‌نشده (E_u) غالباً از مقاومت برشی زه‌کشی‌نشده درجا (S_u) به‌صورت رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود.^[۲]

$$E_u = n S_u \quad (7)$$

که در آن n مقدار ثابتی است که به سطح تنش برشی، نسبت پیش‌تحکیم‌یافتگی و حساسیت رس بستگی دارد. در این روش ابتدا باید مقاومت برشی زه‌کشی‌نشده را از روی مقادیر آزمایش CPT به دست آورد.

۵.۲. m_v

مدول محصورشده‌ی یک‌بعدی (M) به‌صورت ضریبی از q_c تعریف می‌شود. ارتباط m_v و q_c به‌صورت رابطه‌ی ۸ نشان داده شده است.^[۲]

$$M = \alpha_m q_c$$

$$\alpha_m = 2.75 \pm 0.55$$

$$M = \frac{1}{m_v} \Rightarrow m_v = \frac{1}{\alpha_m q_c} \quad (8)$$

نفوذ استاندارد)، CPT (آزمایش نفوذ مخروط)، PMT (آزمایش پرسیمتری) و DMT (آزمایش دیلاتومتری) مطرح‌اند. از میان این روش‌ها، آزمایش نفوذ مخروط (CPT) به‌دلیل دقت و تکرارپذیری نتایج (به‌ویژه در خاک‌های ضعیف)، توصیف بهتر از لایه‌های کم‌ضخامت، سرعت بیشتر انجام و امکان اتصال لوازم و تجهیزات بیشتر به آن و نیز دقت بسیار زیاد آن به‌ویژه در خاک‌های ریزدانه از اهمیت زیادی برخوردار است. بررسی و تعیین میزان دقیق نشست در خاک‌های ریزدانه همواره از مسائل مطرح در مهندسی ژئوتکنیک بوده است. در این نوع خاک‌ها، میزان نشست قابل ملاحظه است و به‌دلیل طولانی‌بودن مدت زمان وقوع، در صورت عدم تعیین دقیق مقدار آن، بروز مشکلات فراوان قابل‌تصور است.^[۱]

۲. روش‌های تعیین پارامترهای ژئوتکنیک با استفاده از نتایج CPT و CPTu

با استفاده از داده‌های آزمایش نفوذ مخروط، اغلب پارامترهای ژئوتکنیکی خاک را می‌توان به دست آورد. در این نوشتار روش‌های تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مهم در تعیین میزان نشست خاک‌ها، با استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu بررسی می‌شود. یادآور می‌شود برای تعیین هر یک از این پارامترها روش‌های مختلفی وجود دارد که به‌دلیل استفاده از نتایج آزمایش CPT، و نیز برای رعایت این نکته که روش مورد استفاده برای کلیه‌ی خاک‌ها قابل‌کاربرد باشد، تنها به ذکر این روش اکتفا می‌شود.

۱.۲. نسبت پیش‌تحکیم‌یافتگی (OCR)

یکی از پارامترهای بسیار مهم در فعالیت‌های ژئوتکنیکی نسبت پیش‌تحکیم‌یافتگی است. این نسبت عموماً به‌صورت تنش‌های مؤثر بیشینه (که در گذشته وجود داشته) به تنش مؤثر حال حاضر تعریف می‌شود. روش‌های تعیین مستقیم OCR براساس نتایج CPT عبارت است از:

۱. استفاده از رابطه‌ی ۱ که براساس اطلاعات CPT پیشنهاد شده است.^[۳]

$$OCR = 0.33 \left[\frac{q_t - \sigma_{v_0}}{\sigma_{v_0}} \right] \quad (1)$$

در این رابطه، q_t نشان‌گر مقاومت مخروط اصلاح‌شده برای فشار آب حفره‌ی در آزمایش CPT است که برای تأثیر فشار آب حفره‌ی اصلاح شده، و σ_{v_0} تنش قائم اولیه است.

۲. اگر در رس‌ها فشار آب حفره‌ی (u_1) اندازه‌گیری شود، استفاده از رابطه‌ی ۲ برای تعیین OCR توصیه می‌شود.^[۴]

$$OCR = 0.81 \left[\frac{q_t - u_1}{\sigma_{v_0}} \right] \quad (2)$$

در این رابطه u_1 فشار آب حفره‌ی روی مخروط است.

۳. از آنجا که تفاوت در فشار حفره‌ی نرمال‌شده (PPD) ممکن است با OCR ارتباط داشته باشد، استفاده از رابطه‌ی ۳ به‌منظور محاسبه‌ی PPD پیشنهاد می‌شود.^[۵]

$$PPD = \frac{u_1 - u_2}{u_0} \quad (3)$$

۳. روابط رایج در تعیین نشست بر مبنای داده‌های

آزمایش CPT

۱. رابطه‌ی ۹ برای تعیین نشست قائم روی خاک‌های ماسه‌یی، با استفاده از نتایج آزمایش CPT ارائه شده که بر اساس نظریه‌ی کشسان به دست آمده است: [۸]

$$S = C_1 C_2 \Delta P \sum \frac{I_z}{C_r E} \Delta z \quad (9)$$

در این رابطه C_1 نشانگر ضریب اصلاح برای عمق مدفون؛ C_2 ضریب اصلاح برای خزش؛ C_2 ضریب اصلاح برای شکل پی و ΔP فشار خالص وارده از طرف پی به زمین است؛ I_z ضریب تأثیر کرنش؛ و Δz ضخامت لایه‌های مورد بررسی و E مدول یانگ است.

۲. رابطه‌ی ۱۰ یک رابطه‌ی ساده اما محافظه‌کارانه برای محاسبه‌ی نشست پی‌ها روی خاک‌های ماسه‌یی است که در آن مستقیماً از نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPT) استفاده شده است. [۹]

$$S = \frac{\Delta P \cdot B}{2 \bar{q}_c} \quad (10)$$

و در آن ΔP فشار خالص وارده از پی به زمین، \bar{q}_c میانگین مقاومت نوک برای عمق تأثیری حدود B است. مدول یانگ (E) در این رابطه برابر $2\bar{q}_c$ در نظر گرفته شده است.

۳. شماره‌ی مدول طبق رابطه‌ی تجربی ۱۱ قابل محاسبه است؛ در شکل ۱ الف نیز رابطه‌ی غیرخطی تنش - کرنش نشان داده شده است. [۱۰، ۱۱]

$$M_t = m \sigma_r \left[\frac{\sigma'_t}{\sigma_r} \right]^{(1-j)} \quad (11)$$

که در آن m شماره‌ی مدول (بدون بعد)؛ j توان تنش؛ σ'_t تنش مؤثر؛ و σ_r تنش مرجع با مقداری معادل ۱۰۰ kPa است. وجود تنش مرجع این امکان را فراهم می‌کند که پارامترهای بی‌بعد در این رابطه مورد استفاده قرار گیرند. از طرفی با توجه به شکل منحنی، رابطه‌ی ۱۲ را خواهیم داشت:

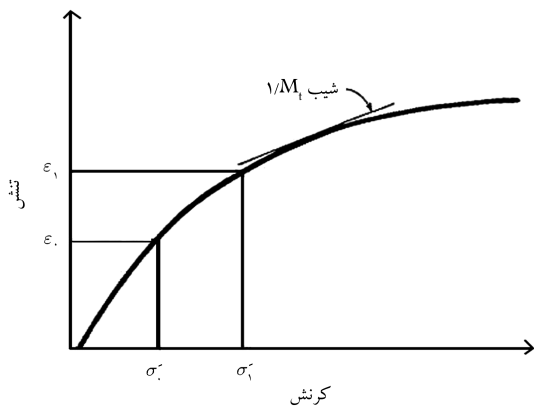
$$\varepsilon = \int_{\sigma'_t}^{\sigma'_t} \frac{1}{M} d\sigma' \quad (12)$$

ترکیب دو رابطه‌ی قبل و حل آن، روابط ۱۳ و ۱۴ را برای تعیین کرنش در لایه‌ی خاک از طریق افزایش تنش مؤثر ارائه می‌دهد.

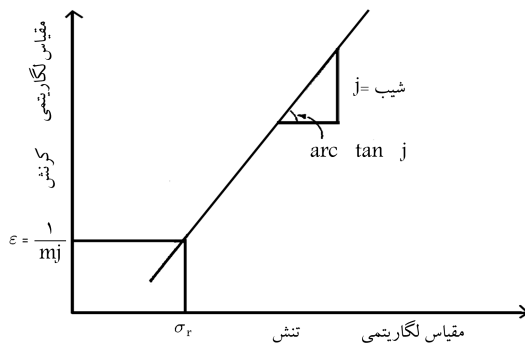
$$\varepsilon = \frac{1}{mj} \left[\left(\frac{\sigma'_t}{\sigma_r} \right)^j - \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_r} \right)^j \right] \quad \text{اگر } j \neq 0 \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \ln \left[\frac{\sigma'_t}{\sigma'_0} \right] \quad \text{اگر } j = 0 \quad (14)$$

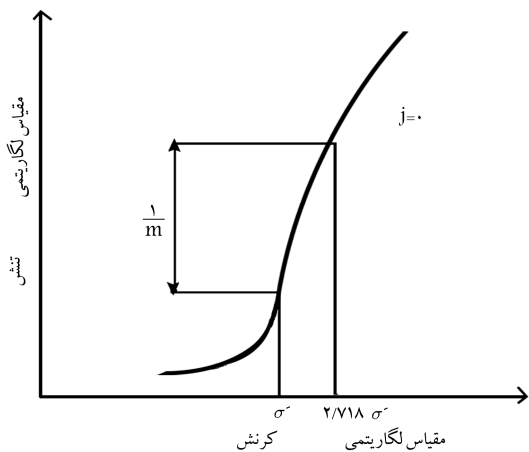
مقدار عددی، شماره‌ی مدول و توان تنش برای استفاده در موارد خاص به وسیله آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین شده (ادومتر - آزمایش سه‌محوری) یا در سایت به‌وسیله‌ی آزمایش بارگذاری صفحه و مشاهدات صحرایی و غیره، قابل تعیین خواهد بود. حل برای $j > 0$ ؛ $\varepsilon = 0$ برای $\sigma'_t = 0$ خط مستقیمی در محورهای لگاریتمی نتیجه خواهد داد (شکل ۱ ب). بنابراین برای یک خط مشخص، شماره مدول و توان تنش را می‌توان از روی مقدار کرنش برای $(\sigma_r = 100 \text{ kPa})$ به دست آورد. اگر توان تنش برابر صفر باشد ($j = 0$) - که برای خاک‌های ریزدانه‌ی رسی



الف) رابطه‌ی غیرخطی تنش - کرنش در وضعیت فشردگی؛ [۱۰]



ب) نمودار تنش - کرنش؛ [۱۰]



ج) منحنی تنش - کرنش برای $j=0$ ؛ [۱۰]

شکل ۱. روابط تنش - کرنش پیشنهادی توسط جانو برای شرایط مختلف [۱۰].

صادق است - تغییرات کرنش در مقابل لگاریتم فشار در شکل ۱ ج نشان داده شده است. این منحنی شبیه آن چیزی است که در آزمایش تحکیم به دست می‌آید. در نهایت رابطه بین C_c و شماره مدول مطابق رابطه‌ی ۱۵ است.

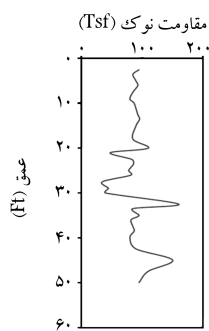
$$m = [Ln(10)] \left[\frac{1 + e_0}{C_c} \right] = 2.30 \frac{1 + e_0}{C_c}$$

$$m_r = [Ln(10)] \left[\frac{1 + e_0}{C_{cr}} \right] = 2.30 \frac{1 + e_0}{C_{cr}} \quad (15)$$

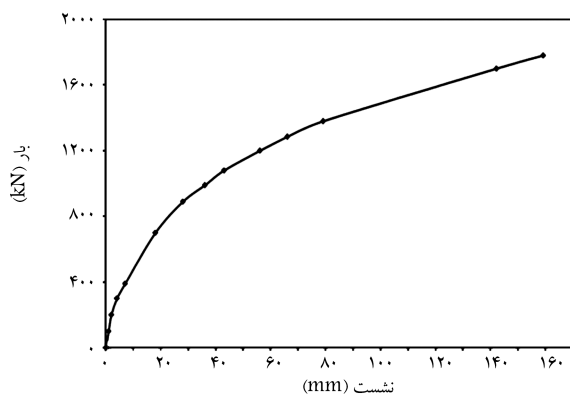
که در آن C_c شاخص تراکم و C_{cr} شاخص انبساط است.

جدول ۱. مقادیر m و z مورد استفاده در رابطه‌ی جانبی.^[۱۰]

شماره مدول	توان تنش	انواع خاک
۱۰۰۰۰۰۰ - ۱۰۰۰۰	۱	مقاومت بالا سنگ
۱۰۰۰ - ۳۰۰	۱	مقاومت کم
۸۰۰ - ۴۰۰	۰٫۵	شن
۴۰۰ - ۲۵۰	۰٫۵	متراکم
۲۵۰ - ۱۵۰	۰٫۵	متوسط
۱۵۰ - ۱۰۰	۰٫۵	شل
۲۰۰ - ۸۰	۰٫۵	متراکم
۸۰ - ۶۰	۰٫۵	متوسط
۶۰ - ۴۰	۰٫۵	شل
۲۰ - ۶۰	۰	سخت
۱۰ - ۲۰	۰	سفت
۵ - ۱۰	۰	نرم
۱ - ۵	۰	خاک‌های آلی و نباتی



الف) یک نمونه پروفیل آزمایش CPT^[۱۳]



ب) منحنی بار - نشست برای پی مورد ۵.^[۱۳]

شکل ۲. نمونه‌ی از اطلاعات مربوط به مقاومت نوک CPT و آزمایش بارگذاری موارد عملی.

نهایت نشست اندازه‌گیری شده موجود است. گفتنی است که از مجموعه موارد عملی سایت آزمایشگاهی ژئوتکنیک در دانشگاه تگزاس، مورد اول تا پنجم مورد آزمایش قرار گرفتند. این پی‌ها که تمامی آنها ضخامت ۱٫۲ متری دارند، بر روی ماسه اجرا شد. خلاصه‌ی از مشخصات موارد عملی جمع‌آوری شده در جدول ۲ ارائه شده و یک نمونه از پروفیل ثبت شده‌ی آزمایش CPT و منحنی بار-نشست برای پی مورد ۵، در شکل ۲ نشان داده شده است.^[۱۳]

۵. رابطه پیشنهادی

رابطه‌ی جانبی که برآورد نشست برای تمامی خاک‌ها را شامل می‌شود مبتنی بر استفاده از نظریه‌ی تنش-کرنش و تغییرات سطح تنش است، و توسط آیین‌نامه‌ی کانادایی مهندسی پی (CFEM، ۱۹۹۲) به‌عنوان روشی هماهنگ برای محاسبه‌ی نشست پی‌های سطحی و عمیق توصیه شده است.^[۱۱] بنابراین در ارائه و توسعه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی از رابطه‌ی پایه‌ی جانبی استفاده شده است. چنان‌که نشان داده شد، جانبی براساس نوع خاک دو رابطه‌ی متفاوت ارائه کرده است. این جداسازی به‌دلیل تفاوت در رفتار خاک‌های دانه‌ی و خاک‌های چسبیده در برابر نشست ناشی از سربار خارجی است، در حالی که می‌توان چنین در نظر گرفت که با وجود این که رس بسیار پیش‌تحکیم یافته جزو دسته خاک‌های چسبیده است، میزان نشست حاصله در آن تحت سربار خارجی بسیار کم، و شاید حتی بسیار کم‌تر از میزان نشست حاصله در خاک‌های ماسه‌ی شل تحت اثر همان سربار باشد. رفتار خاک‌های رسی نرم و خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته، خاک‌های رسی پیش‌تحکیم یافته با درجه‌ی پیش‌تحکیمی کم و نیز خاک‌های رسی پیش‌تحکیم یافته با درجه‌ی پیش‌تحکیمی

محاسبه‌ی نشست در خاک‌های رسی پیش‌تحکیم یافته با استفاده از روش شماره‌ی مدول اساساً مانند استفاده از روش نسبت تخلخل است. رابطه‌ی ریاضی آن به‌صورت رابطه‌ی ۱۶ است.

$$\varepsilon = \frac{1}{m_r} \ln\left[\frac{\sigma'_p}{\sigma'_i}\right] + \frac{1}{m} \ln\left[\frac{\sigma'_i + \Delta\sigma'}{\sigma'_p}\right] \quad (16)$$

که در آن ε کرنش در لایه‌ی تحت تحکیم؛ m شماره‌ی مدول؛ m_r شماره‌ی مدول پیش‌تحکیم یافته؛ σ'_p فشار پیش‌تحکیم یافتگی؛ σ'_i فشار مؤثر اولیه و $\Delta\sigma'$ افزایش تنش در مرکز لایه بر اثر اعمال بار است. مقادیر توان تنش (z) و نیز شماره‌ی مدول (m) استفاده شده در این روابط در جدول ۱ نشان داده شده است.

۴. شرح اطلاعات موارد عملی

برای سنجیدن رابطه‌ی پیشنهادی و مقایسه‌ی آن با موارد عملی، و نیز بررسی کفایت سایر روش‌های رایج شامل اشترمن، جانبی و مایرهورف، نسبت به جمع‌آوری یک بانک اطلاعات اقدام شد. در این راستا ۵۲ مورد عملی از منابع معتبر جمع‌آوری شد. این موارد شامل ۳۰ مورد پی تک، ۵ مورد پی نواری، و ۷ مورد پی گسترده بوده که عمق مدفون این موارد از ۰٫۷۶ تا ۲ متر متغیر است. نشست‌ها در هر مورد به‌صورت میانگین است که در محدوده‌ی ۳۶ میلی‌متر تا ۱۵۰ میلی‌متر و در پایان دوره‌ی نشست آبی یا تحکیمی اندازه‌گیری شده است، پروفیل q_c ثبت شده در این سایت‌ها در محدوده مقادیر ۵ MPa تا ۲۰ MPa است و طبق نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی، خاک زیر این پی‌ها در پاره‌ی از موارد شامل رس و لای، و در موارد دیگر ترکیبی از شن و ماسه است. ۱۰ مورد از این موارد به‌کالیبره‌کردن رابطه‌ی پیشنهادی اختصاص یافت و ۴۲ مورد باقی‌مانده شامل پی‌های سطحی است که به‌صورت منفرد، نواری و گسترده، به‌منظور تعیین دقت رابطه‌ی پیشنهادی و مقایسه‌ی نتایج آن با سایر روابط مورد استفاده قرار خواهد گرفت. عمق بررسی‌های صورت گرفته تا محدوده‌ی افزایش تنش ناشی از سربار است. در این نمونه‌ها، مقدار q_c ، f_s ، بار وارده بر پی، ابعاد پی، عمق مدفون و در

جدول ۲. مشخصات موارد عملی جمع آوری شده. [۱۲-۱۵]

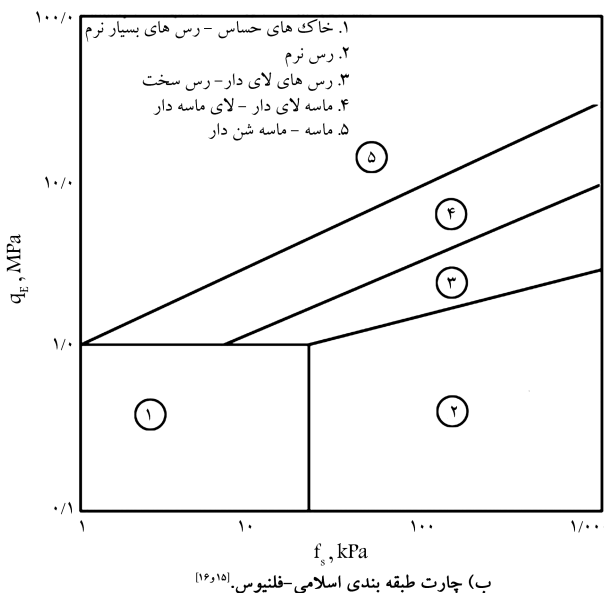
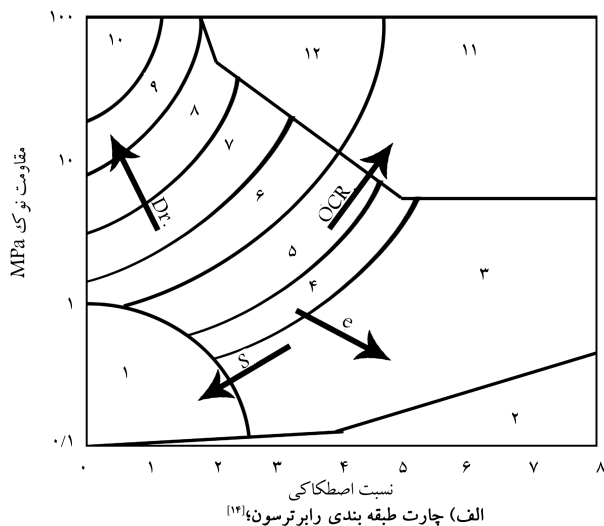
شماره مورد عملی	شماره مرجع	q (kPa)	B (m)	L (m)	D_f (m)	q_c (Mpa)	R_f (%)	S_m (mm)
۱	۱۳	۱۱۳۳,۳	۳	۳	۰,۵	۱۸	۲	۱۵۰
۲	۱۳	۱۴۷۶,۵	۱,۵	۱,۵	۰,۷	۱۷,۲	۳	۱۴۵
۳	۱۳	۹۸۷,۲	۳	۳	۰,۸	۱۶,۸	۱	۱۵۲
۴	۱۳	۱۱۳۳,۳	۲,۵	۲,۵	۱	۱۷,۷	۳	۱۴۷
۵	۱۳	۱۸۳۲,۸	۱	۱	۱,۲	۱۷,۳	۲	۱۶۰
۶	۱۳	۲۹۰	۲,۲	۲,۲	۰,۶	۱۶	۴	۱۰۵
۷	۱۵	۱۸۲	۲۲,۴	۳۳,۴	۳	۱۷,۵	۵	۱۸۴
۸	۱۲	۱۹۹	۴,۵	۵,۷۱	۳	۱۷,۷	۵	۳,۹
۹	۱۲	۸۳	۱۵	۷۲,۹	۳	۱۷,۳	۴	۵,۴
۱۰	۱۲	۲۵۵	۱,۶	۱۲,۶	۰,۳۸	۱۷	۶	۹,۳
۱۱	۱۶	۲۵۵	۱,۱۵	۱۲,۶۵	۰,۲۷	۱۷,۱	۱	۱۰
۱۲	۱۶	۳۰۰	۰,۸	۱۸,۴	۰,۲۳	۱۷,۸	۷	۵,۸
۱۳	۱۲	۲۱۰	۱,۸	۲۴,۱۲	۰,۲۱	۱۷,۱	۱	۱۶,۹
۱۴	۱۲	۱۷۰	۲۳,۶	۲۵,۹۶	۳,۱۱	۱۶,۸	۵	۱۱,۷
۱۵	۱۵	۱۵۶	۲۱,۷	۲۱,۷	۳	۱۷	۱	۲۰,۸
۱۶	۱۵	۳۱۰	۳,۳	۵,۷۷	۳	۱۷,۸	۲	۱۱
۱۷	۱۲	۳۱۰	۳,۶	۶,۳	۳	۱۶,۹	۱	۱۲,۷
۱۸	۱۶	۳۱۰	۴,۵	۶,۸	۳	۱۷,۲	۱	۱۸,۳
۱۹	۱۶	۱۷۶	۳,۶	۳,۶	۰,۱۰	۱۲,۶	۸	۱۸
۲۰	۱۶	۲۱۸	۲,۶	۲۲,۹	۲	۴	۵	۳۲,۵
۲۱	۱۶	۱۱۰	۸,۶	۱۵	۱	۱۶,۳	۴	۱۱
۲۲	۱۵	۲۲۴	۱	۱	۰,۱۰	۱۳,۵	۳	۳,۶
۲۳	۱۵	۲۲۴	۰,۵	۲	۰,۱۰	۱۰	۷	۴
۲۴	۱۵	۵۷۵	۱	۱	۱	۱۶	۵	۴,۴
۲۵	۱۶	۳۴۷	۱	۱	۰,۵	۷	۴	۵,۵
۲۶	۱۶	۱۳۱	۰,۶	۱	۰,۳۳	۱,۸	۵	۶,۹
۲۷	۱۶	۲۳۰	۰,۶	۱	۰,۳	۲,۲	۴	۱۲,۷
۲۸	۱۲	۱۳۶	۰,۹	۰,۹	۰,۹	۲,۰۸	۴	۷,۶
۲۹	۱۲	۱۱۵	۰,۹	۰,۹	۰,۹	۲,۳	۳	۶,۴
۳۰	۱۲	۲۰۲	۱,۲	۱,۲	۰,۲	۲,۷	۵	۱۳
۳۱	۱۵	۲۷۴	۱,۱	۱,۱	۰,۸	۳,۲	۴	۱۲,۷
۳۲	۱۵	۱۲۲	۳,۳	۱۴,۴۸	۰,۱۰	۲	۴	۶۵
۳۳	۱۵	۲۱۷	۹,۵	۱۰,۰۷	۴,۵	۱۰	۲	۲۲
۳۴	۱۲	۲۶۵	۵	۸,۵	۲,۵	۱۴	۴	۱,۱۶
۳۵	۱۵	۲۵۰	۱	۱	۰,۱۰	۷,۲	۴	۸
۳۶	۱۵	۱۵۰	۱	۱	۰,۱۰	۶,۷	۵	۵
۳۷	۱۵	۲۵۰	۱	۱	۰,۱۰	۳,۴	۷	۷
۳۸	۱۵	۱۵۰	۱	۱	۰,۱۰	۴,۴	۳	۷
۳۹	۱۵	۲۵۰	۲,۵	۲,۵	۰,۱۰	۵,۷	۴	۲۰,۵
۴۰	۱۶	۲۵۰	۲,۵	۲,۵	۰,۱۰	۹,۹	۶	۱۷,۸
۴۱	۱۶	۱۵۰	۱	۱	۰,۱۰	۷,۲	۵	۵,۴
۴۲	۱۶	۱۲۰	۲,۵	۲,۵	۰,۱۰	۱۰,۹	۴	۰,۸

هستند. از طرف دیگر هرچه نمونه خاک به سمت خاک‌های متراکم پیش رود مقدار عددی q_t بزرگ شده و این نشان‌دهنده‌ی مقاومت خوب این خاک‌ها در برابر نفوذ مخروط آزمایش CPT است و پیش‌بینی می‌شود که در این خاک‌ها مقدار عددی نشست کوچک باشد. چنان که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در رابطه‌ی ارائه‌شده توسط جانبو در تعیین کرنش برای خاک‌های شنی، ماسه‌ها و لای‌ها در هر ۳ حالت شل، متراکم و بسیار متراکم برای z عدد ۰٫۵ و برای خاک‌های رسی در حالت سخت، سفت و بسیار نرم عدد صفر در نظر گرفته شده است. همین‌طور حدود ارائه شده برای m محدودی بسیار وسیعی از تغییرات را در هرکدام از انواع خاک‌ها نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال استفاده از محدوده‌ی تغییرات ۵ تا ۶۰ برای خاک‌های رسی می‌تواند نتایج کرنش محاسبه‌شده در این نوع خاک‌ها را دچار خطای فراوانی کند.

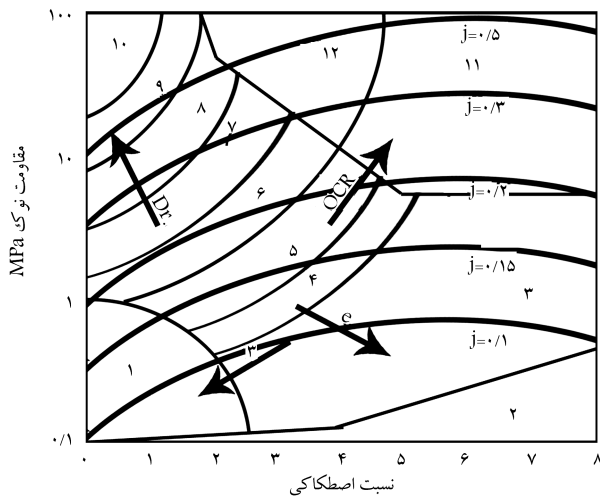
حدود ارائه‌شده توسط جانبو برای m ، در رس‌های سخت در محدوده‌ی ۵ تا ۶۰ و در شن‌ها در محدوده‌ی ۴۰ تا ۸۰ تغییر می‌کند در حالی که خاک‌های رسی پیش‌تحکیم‌یافته در مقابل افزایش تنش مؤثر سربار می‌توانند مانند خاک‌های دانه‌بزرگ متراکم دارای مقادیر نشست بسیار کمی باشند. چنان که بیان شد انتخاب عدد مناسب در میان حدود ارائه‌شده برای m یکی از مشکلات استفاده از این رابطه است. علاوه بر آن، تشخیص صحیح حالت خاک مورد بررسی نیز از دیگر مشکلات موجود در استفاده از این جدول است به‌طوری که تشخیص ماسه‌ی متراکم از ماسه‌ی متوسط یا رس نرم از رس سفت کار دشواری است. روش‌ها و چارت‌های متعددی برای تشخیص حالات خاک‌ها ارائه شده، اما در تمامی آنها در مرزهای جداکننده‌ی حالات مختلف، تصمیم‌گیری با دشواری و خطا همراه است.

در نتیجه به‌جای این که از ابتدا خاک در سایت تحت آزمایش دانه‌بندی قرار بگیرد و گروه آن مشخص شود و سپس از نتایج آن مانند روش جانبو، مقدار z معادل صفر یا ۰٫۵ در نظر گرفته شود، پیشنهاد می‌شود فقط از نتایج حاصل از آزمایش CPT، یعنی نتایج مستقیم آن که شامل q_c و f_s است، میزان و احتمال نشست محاسبه شود. در این صورت اگر خاکی دارای q_t بزرگی باشد بدون توجه به جنس آن که ممکن است ماسه‌ی متراکم یا رس بسیار پیش‌تحکیم‌یافته باشد، می‌توان گفت این خاک تحمل بیشتری در مقابل نشست خواهد داشت؛ و بنابراین انتظار می‌رود در مقایسه با خاک‌هایی که q_t کوچکی دارند، تحت فشار سربار یکسان، نشست کم‌تری داشته باشند. براساس این چارت، خاک‌هایی که از نظر مقدار q_t در یک ناحیه قرار می‌گیرند، از تحمل فشار یکسانی برخوردار خواهند بود. بنابراین می‌توان رابطه‌ی جدید را چنین تعریف کرد: بر خلاف روش جانبو که در آن خاک‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، و براساس رفتار واقعی و موقعیت واقعی در چارت طبقه‌بندی، یک عدد مناسب برای z آنها در نظر گرفته می‌شود. در این صورت اگر به‌عنوان مثال، برای z در خاک رس بسیار پیش‌تحکیم‌یافته در روش جانبو عدد صفر و در ماسه‌ی متراکم عدد ۰٫۵ در نظر گرفته می‌شود، در اینجا برای این دو به‌دلیل رفتار یکسان در تحمل‌کردن فشار و دارا بودن مقدار بزرگی از q_c و در کل برای خاک‌های این ناحیه که دارای این ویژگی‌ها هستند، عدد ۰٫۵ برای z در نظر گرفته شود. همین‌طور در خاک‌های رسی عادی تحکیم‌یافته که جانبو برای z آنها عدد صفر و در ماسه‌های شل عدد ۰٫۵ را در نظر می‌گرفت عدد یکسان دیگری برای آن در نظر گرفته شود. با استفاده از این روش می‌توان به‌جای استفاده از دو رابطه‌ی جداگانه برای خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه بدون توجه به نوع خاک تنها از یک رابطه‌ی واحد برای تمامی خاک‌ها استفاده کرد. همچنین با مطالعه‌ی دقیق حدود مورد استفاده به‌عنوان m در رابطه‌ی جانبو، می‌توان به این نتیجه رسید که در واقع این مقادیر پیشنهادی برای m مانند مقدار q_c حاصل از آزمایش CPT در خاک‌های سفت و سخت زیاد

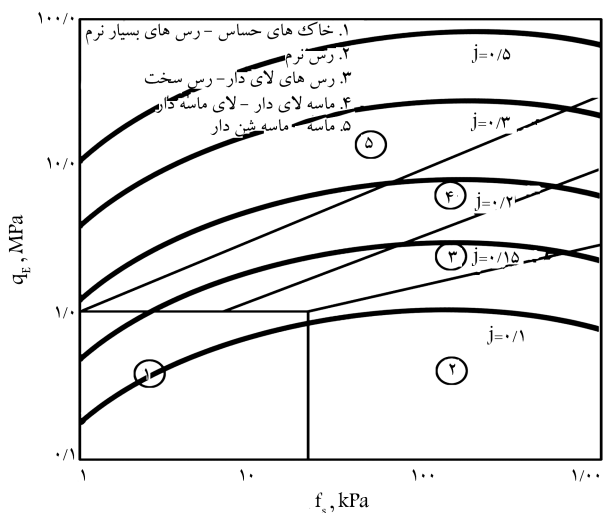
زیاد از نظر ویژگی‌های رفتاری که در مواجهه با تنش قائم از خود نشان می‌دهند یکسان نیست. توانایی خاک رسی با درجه‌ی پیش‌تحکیمی بالا برای تحمل فشار بسیار زیاد است، در نتیجه نشست‌های احتمالی روی این نوع خاک باید اندک باشد. در ضمن خاک‌های ماسه‌ی شل در برابر فشارهای قائم وارده متحمل کرنش زیادی می‌شوند؛ بنابراین به نظر می‌رسد بهتر است خاک‌ها براساس میزان تحمل فشار سربار گروه‌بندی شوند. طبق مطالعات صورت‌گرفته، بهترین پارامتر برای تشخیص عکس‌العمل خاک‌ها در برابر نشست q_t است، که همان q_c اصلاح‌شده برای تأثیر فشار آب حفره‌ی است. به‌عبارتی هرچه q_c خاکی بزرگ‌تر باشد می‌توان پیش‌بینی کرد که نشست کم‌تری در برابر سربار وارده خواهد داشت. براساس چارتی که در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۷ ارائه شد، خاک‌های مختلف براساس q_t و R_f طبقه‌بندی شده‌اند.^[۱۴-۱۶] در این چارت‌ها که در شکل ۳ نشان داده شده، خاک‌های رسی نرم و حساس و خاک‌های دانه‌ی شل q_t کوچکی دارند، اما خاک‌های رسی، در مقایسه با خاک‌های دانه‌ی شل، علاوه بر داشتن q_t کوچک دارای مقدار R_f بزرگ‌تری



شکل ۳. دینامونه از چارت طبقه‌بندی خاک‌ها توسط CPT.



الف) چارت رابرتسون به همراه آرای پیشنهادی؛



ب) چارت اسلامی-فلنیوس به همراه آرای پیشنهادی؛

شکل ۴. مقادیر پیشنهادی j برای چارت های طبقه بندی خاک ها با CPT.

محققین اعلام کردند که روابط ارائه شده برای تحکیم براساس آزمایش و فرضیات به عمل آمده در حالت تحکیم یک بعدی است که در عمل و در سایت چنین وضعیتی را نداشته و اصلاحاتی در این خصوص برای فشارهای اطراف صورت می گیرد.^[۱] در استفاده از رابطه پیشنهادی مقدار ضرایب اصلاح اختصاص یافته به خاک های ریزدانه و نیز محل قرارگیری آنها مطابق شکل ۵ تعیین شده است.

۶. ارزیابی روش ها و بحث در نتایج

بررسی ها بر روی سی مورد پی نک، پنج مورد پی نواری و هفت مورد پی گسترده صورت گرفت. در تمامی این موارد عمق مدفون کم تر از عرض پی بود و در نتیجه همگی جزو پی های سطحی محسوب می شوند. مقدار نشست برای این موارد بین ۳۶ تا ۱۵۰ میلی متر ثبت شده است. در شکل ۶ مقایسه ای بین نشست های اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه پیشنهادی، روش های اشترمن، جانبو و مایرهورف در خاک های درشت دانه نشان داده شده است. چنان که از این

و در خاک های نرم و شل بسیار کم است. بنابراین می توان این مقادیر را با ضریبی از q_c آنها جایگزین کرد؛ به عبارت دیگر در رابطه ی جانبو به جای استفاده از m ضریبی از q_c استفاده شود ($m = \alpha q_c$). پس از بررسی چند ضریب مختلف برای q_c و بررسی دقت، به منظور تخمین میزان سختی خاک (E) نتیجه ی حاصله چنین بود که بهترین ضریب برای رسیدن به دقت بیشینه در خاک ها، ضریب ۲ برای q_c است. بنابر این شماره مدول جانبو به وسیله ی پارامتر $2q_c$ جایگزین می شود. برای اصلاح رابطه ی جانبو و تغییر آن به بهترین شکل ممکن، به طوری که تنها از نتایج آزمایش CPT در آن استفاده شود، باید بتوان مقادیر مناسبی را برای مقدار j خاک های مختلف به دست آورد. برای این کار از چارت رابرتسون استفاده شد. با استفاده از ۱۰ مورد عملی جمع آوری شده مقادیر متفاوتی از j در نواحی مختلف فرض شد و محاسبات انجام گرفت. پس از بررسی جواب های حاصل از رابطه ی پیشنهادی و مقایسه ی آنها با مقادیر نشست اندازه گیری شده، با توجه به شکل ۴ الف رابطه ی ۱۷ برای تعیین j مناسب خاک ها از روی نتایج آزمایش CPT پیشنهاد شد.

$$j = \frac{q_T \left[1 + (0.7 \cdot 0.5 \log q_T) \times R_f^j \right]}{0.5 \log q_T (11 \sqrt{R_f} + R_f^j)} \quad (17)$$

که در آن فشار آب خفیه ی اصلاح شده است و برحسب واحد kg/cm^2 یا bar سنجیده می شود؛ R_f نیز به صورت درصد استفاده شده است. پس از یافتن j مقادیر به دست آمده در رابطه ی ۱۸ جایگذاری شد.

$$\varepsilon = \frac{1}{2 q_T j} \left[\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'_0}{100} \right)^j - \left(\frac{\sigma'_0}{100} \right)^j \right] \quad (18)$$

در این رابطه σ'_0 تنش مؤثر اولیه در مرکز لایه ی مورد بررسی تحت اثر وزن خاک بالای آن نقطه است و $\Delta \sigma'_0$ بیانگر افزایش تنش مؤثر در مرکز لایه ی مورد بررسی تحت اثر وجود سربار خارجی یکنواخت روی پی است.

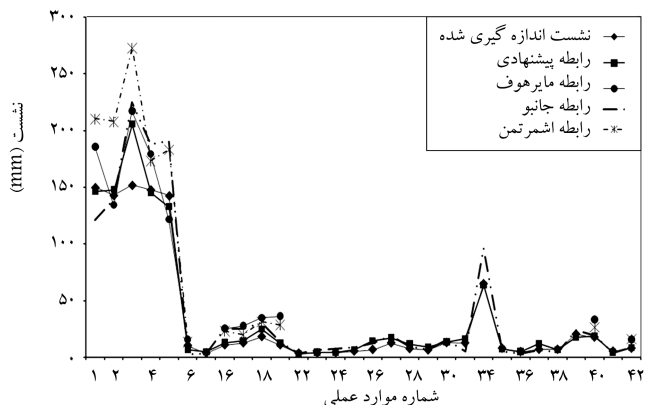
با توجه به رابطه ی ۱۸ و با توجه به دقت لازم برای نتایج، می توان عمق تأثیر تنش را - که در مورد پی های نک ۲ تا ۳ برابر عرض پی و برای پی های نواری ۳ تا ۴ برابر عرض پی و در پی های گسترده ۱ تا ۱.۵ برابر عرض پی است - به لایه هایی با ضخامت کم تقسیم کرد. ضخامت این لایه ها با توجه به دقت مورد نیاز تعیین می شود. در هر صورت با توجه به این که آزمایش CPT به ازای هر ۲.۵ سانتی متر نفوذ در عمق، مشخصات خاک را اعم از q_c و f_s اندازه گیری می کند، می توان ضخامت لایه های مورد بررسی را حتی تا ۲.۵ سانتی متر نیز کاهش داد. مقدار ε (کرنش) برای خاک ها از رابطه ی ۱۹ نتیجه می شود.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \quad (19)$$

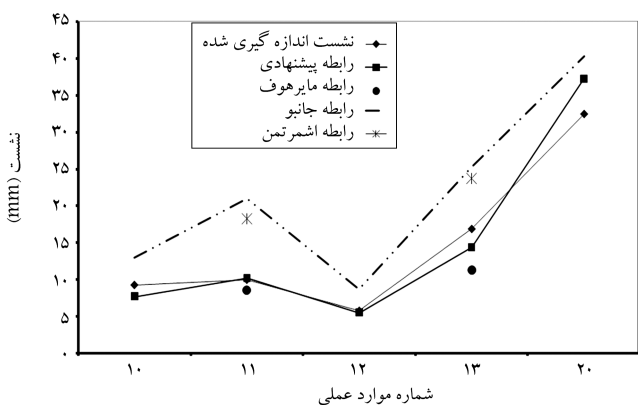
رابطه ی ۱۷ را با تغییر بسیار کمی در دو پارامتر موجود در آن، می توان برای چارت طبقه بندی اسلامی - فلنیوس^[۱۵] که در شکل ۳ ب نیز نشان داده شده است، مورد استفاده قرار داد. برای استفاده از رابطه ی پیشنهادی در چارت مورد نظر باید از پارامتر f_s به جای R_f و از پارامتر q_E به جای q_T استفاده کرد. محل قرارگیری j بر روی چارت اسلامی-فلنیوس در شکل ۴ ب نشان داده شده است. برای تعیین مقدار نشست خاک (ΔH)، تغییر ضخامت) می توان مقدار کرنش به دست آمده را در ضخامت لایه ی مورد بررسی، می تواند حتی دارای مقدار بسیار کوچک ۲.۵ سانتی متر نیز باشد، ضرب کرد. در انتهای محاسبات توجه به این نکته ضروری است که اگر پس از تعیین محل خاک در چارت رابرتسون، خاک در محدوده ی خاک های رسی قرار گرفت باید از یک ضریب اصلاح استفاده کرد. در سال ۱۹۷۲

شکل پیداست مقادیر نشست پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی به مقادیر نشست‌های اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر از سایر روش‌ها است. در شکل ۶ ب نشست‌های اندازه‌گیری شده در خاک‌های ریزدانه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی و روش جانبی نشان داده شده است. در اینجا نیز نشست‌های پیش‌بینی شده براساس رابطه‌ی پیشنهادی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر از روش جانبی است.

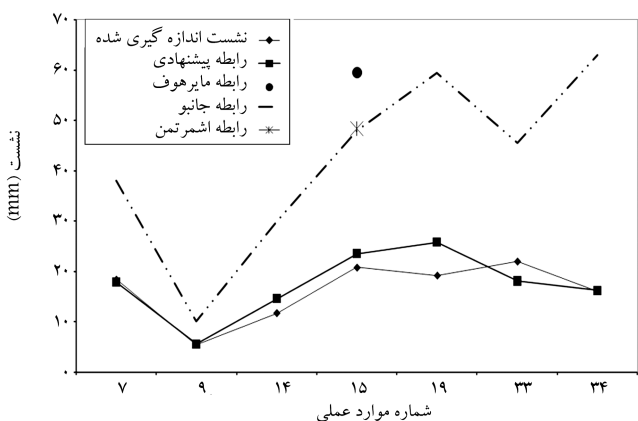
در شکل ۷ نشست‌های اندازه‌گیری شده و نیز مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی و روابط اشمرتمن، جانبی و مایهوف را به ترتیب در پی‌های تک (شکل ۷الف)، پی‌های نواری (شکل ۷ب) و پی‌های گسترده (شکل ۷ج) نمایش داده شده است. با دقت در شکل ۷الف مشاهده می‌شود که مقادیر نشست پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی و مقادیر نشست اندازه‌گیری شده در پی‌های تک بسیار نزدیک و حتی در اغلب موارد بر هم منطبق‌اند. در شکل ۷ب، مقادیر پیش‌بینی شده



الف) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر به دست آمده از رابطه‌های ارائه شده در پی‌های تک؛

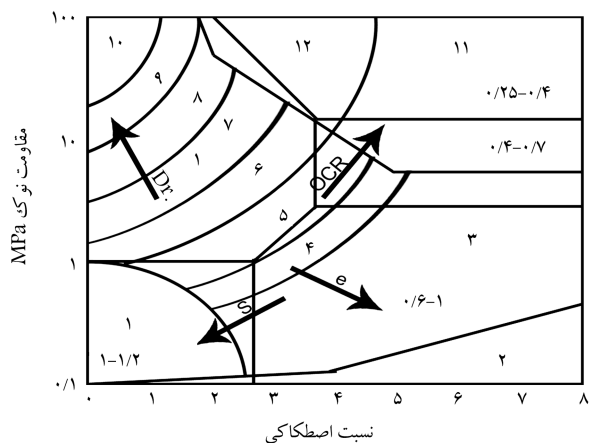


ب) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر به دست آمده از رابطه‌های ارائه شده در پی‌های نواری؛

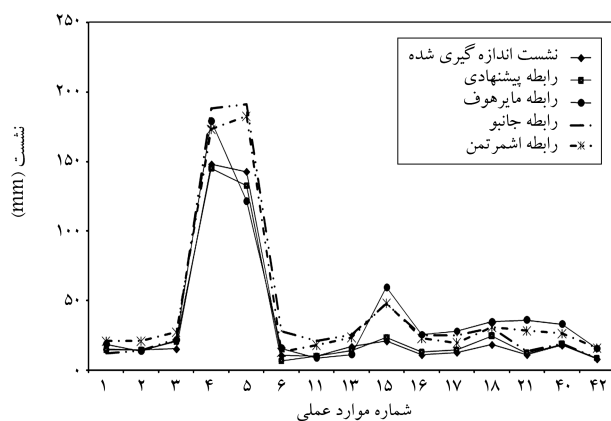


ج) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر به دست آمده از رابطه‌های ارائه شده در پی‌های گسترده.

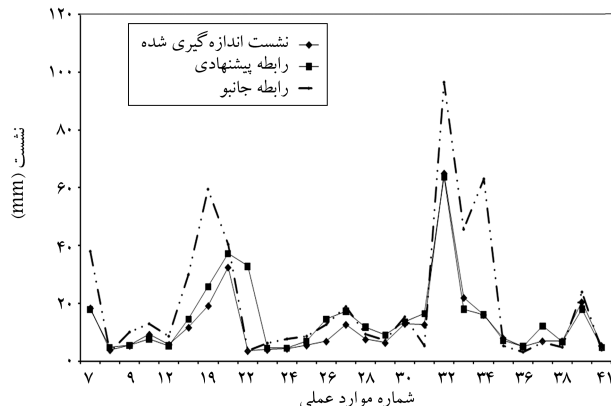
شکل ۷. مقایسه مقادیر نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای پی‌های مختلف.



شکل ۵. محل ضرایب اصلاح در چارت رابرتسون برای خاک‌های نرم و شل.



الف) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر به دست آمده از رابطه‌های جانبی، اشمرتمن، مایهوف و رابطه‌ی پیشنهادی در خاک‌های درشت‌دانه؛



ب) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر به دست آمده از رابطه‌ی جانبی و رابطه‌ی پیشنهادی در خاک‌های ریزدانه.

شکل ۶. مقایسه مقادیر نشست اندازه‌گیری پیش‌بینی شده توسط روابط مختلف.

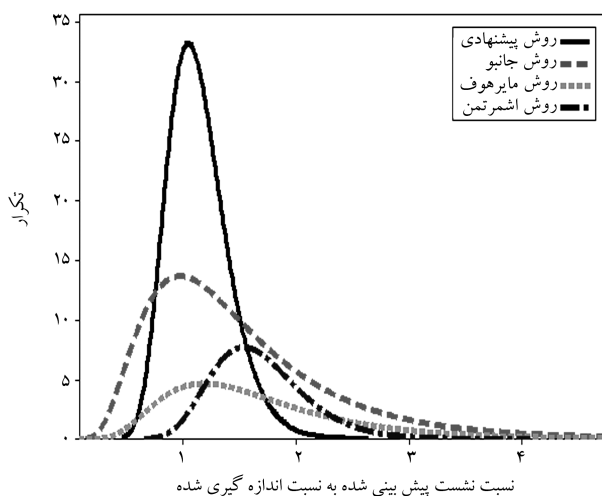
داده‌ها که برحسب اندازه مرتب شده‌اند. نمودار تصویری روشن از داده‌ها ارائه کرده و از آن به‌سادگی سه مشخصه‌ی شکل توزیع، موقعیت یا تمایل به مرکزیت توزیع، پراکندگی یا گسترش توزیع مشاهده می‌شود.

مهم‌ترین اندازه تمایل به مرکزیت نمونه «میانگین نمونه» است و پراکندگی یا گسترش داده‌های نمونه با انحراف استاندارد نمونه نشان داده می‌شود. هرچه انحراف استاندارد یک نمونه بیشتر باشد، پراکندگی یا گسترش داده‌ها بیشتر است.

اکثر پدیده‌های طبیعی را می‌توان با توزیع نرمال توصیف کرد؛ نقطه‌ی وسط این منحنی نشان‌گر «میانگین داده‌ها» است. در روش لگاریتمی - نرمال، برخلاف توزیع نرمال، منحنی حول میانگین داده‌ها به‌صورت مساوی پخش نمی‌شود. در حقیقت در این روش منحنی براساس وزن داده‌ها شکل گرفته و حول مقدار میانگین پخش می‌شود.

در شکل ۹ منحنی تغییرات نرمال رسم شده برای کلیه‌ی روش‌های مورد بررسی نشان داده شده است. قله منحنی نرمال نشان دهنده نسبت میانگین نشست پیش‌بینی شده به میزان نشست اندازه‌گیری شده است. با دقت در این منحنی‌ها می‌توان مشاهده کرد که قله منحنی نرمال در رابطه پیشنهادی به عدد ۱ نزدیک بوده و این می‌تواند تاییدی بر دقت بیشتر رابطه پیشنهادی نسبت به سایر روابط باشد. خلاصه مشخصات قابل تعیین به‌وسیله‌ی این منحنی‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ منحنی تغییرات نرمال - لگاریتمی رسم شده برای روابط ارائه شده برحسب موارد پیش‌بینی شده و نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده نشان داده شده است.

براساس این منحنی‌ها، در رابطه‌ی پیشنهادی، نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده در ۳۴ مورد از کل موارد مورد بررسی، برابر ۱/۱۳ است.



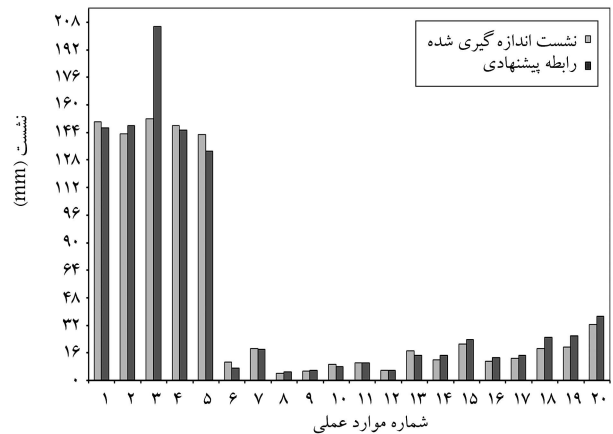
شکل ۹. منحنی‌های نرمال برای نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده برای روابط ارائه شده.

جدول ۳. خلاصه‌ی مشخصات منحنی‌های نرمال رسم شده برای روش‌های مورد بررسی.

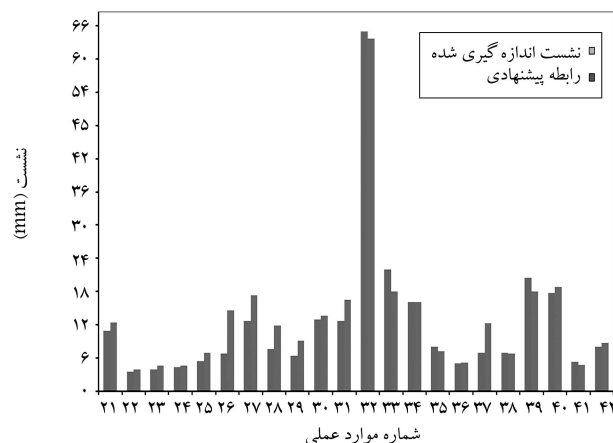
روش	نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده	نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده	نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده	نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده
روش اشترمن	۱/۶۷	۱/۴۹	۱/۶۵	۱/۱۳
روش میانگین	۰/۴۲	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۲۹

توسط رابطه‌ی پیشنهادی قدری از نشست‌های اندازه‌گیری شده فاصله گرفته، ولی همچنان دقت پیش‌بینی توسط این رابطه بیشتر از سایر روابط مورد بررسی است. شکل ۷ نشان می‌دهد که مقدار عددی نشست پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی و نشست اندازه‌گیری شده در اکثر موارد موجود اختلاف داشته و نسبت به پی تک و پی نواری از دقت کم‌تری برخوردار است. دلایل این مسئله می‌تواند ابعاد بزرگ پی گسترده در نتیجه عمق تأثیر زیاد، صلب عمل نکردن پی گسترده و بارگذاری نامتقارن و در نتیجه توزیع تنش غیریکنواخت زیر پی باشد. تمامی موارد یاد شده می‌تواند محاسبات را دچار خطا کرده و در نتیجه مقادیر پیش‌بینی شده به‌طور چشم‌گیری متفاوت از مقادیر اندازه‌گیری شده باشند؛ کما این که در منابع به محل دقیق اندازه‌گیری نشست در زیر پی رادیه نیز اشاره نشده است. با این وجود اختلاف عددی بین رابطه‌ی پیشنهادی و مقدار اندازه‌گیری شده نسبت به سایر روابط ارائه شده کم‌تر است.

در شکل ۸ مقایسه‌ی بین نشست‌های پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی و نشست‌های اندازه‌گیری شده در تمامی موارد عملی مورد بررسی صورت گرفته است. با مطالعه‌ی این نمودار مشخص شد که نشست‌های پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی پیشنهادی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک است. روش‌های آمار و احتمال می‌تواند در مورد صحت و دقت روابط قضاوت کند. «توزیع فراوانی» ترتیبی است از

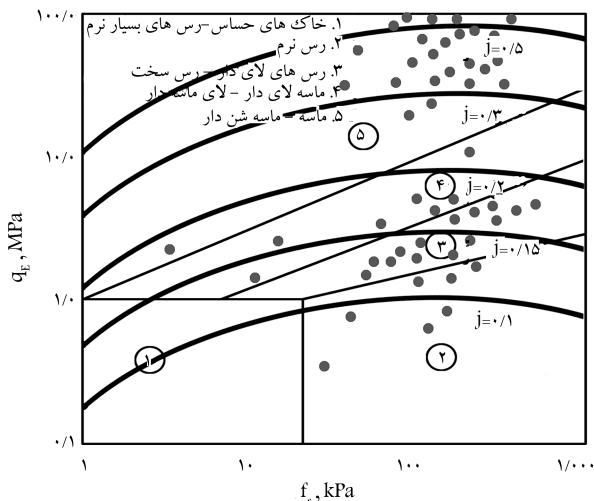


الف) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی در موارد ۱ تا ۲۰؛



ب) مقایسه‌ی نشست‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی در موارد ۲۱ تا ۴۲.

شکل ۸. نمودار ستونی جهت مقایسه نشست‌های اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده.

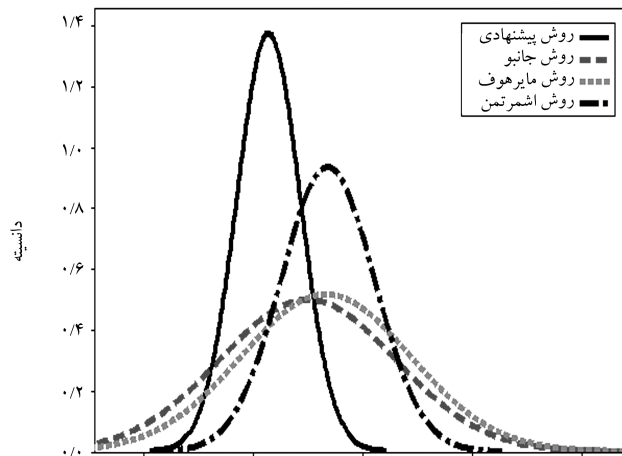


شکل ۱۳. چارت اسلامی- فلنیوس به همراه زهای پیشنهادی و نقاط معادل موارد عملی.

حضور این ۳۴ مورد در قله‌ی منحنی نشان می‌دهد که این رابطه قادر است در بسیاری از موارد، نشست‌ها را نزدیک به نشست اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کند. در سایر روابط، تعداد موارد پیش‌بینی شده در قله‌ی منحنی‌ها به مراتب کم‌تر است. در شکل ۱۱ منحنی‌های فراوانی تجمعی برای روابط مورد بررسی ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، منحنی فراوانی رسم شده برای رابطه‌ی پیشنهادی دارای شیب کم‌تری است که این نشان‌دهنده‌ی پراکندگی کم‌تر در پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته است. همچنین هرچه این منحنی‌ها در احتمال ۵۰٪ به نسبت ۱ نزدیک‌تر باشند، دقت بیشتری در پیش‌بینی دارند؛ براین اساس مشاهده می‌شود که منحنی رسم شده برای رابطه‌ی پیشنهادی نسبت به سایر روابط ارائه شده به عدد ۱ نزدیک‌تر است. برای بررسی جامعیت رابطه‌ی پیشنهادی، نقاط معادل موارد عملی در شکل ۱۲ (چارت رابرتسون) و ۱۳ (چارت اسلامی - فلنیوس) نشان داده شده است.

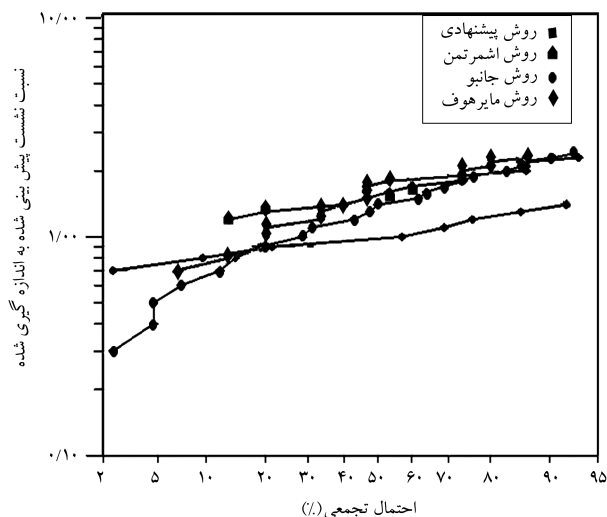
۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از بررسی روابط متعددی که برای تعیین نشست در پی‌ها ارائه شده، رابطه‌ی پایه‌ی تعریف شد که در آن با در نظر داشتن پارامترهای مؤثر در میزان نشست، از قبیل فشار وارده از طرف سر بار (q)، عرض پی (B)، عمق منطقه‌ی تأثیر، تنش مؤثر اولیه در لایه، و سختی خاک بتوان میزان نشست را توسط رابطه‌ی واحد و با دقت بالاتری تعریف کرد. این عمل از طریق تغییر در پارامترهای m و z فرض شده در رابطه‌ی جانبی صورت گرفت. پارامتر m در رابطه‌ی جانبی بیان‌گر میزان سختی خاک، و پارامتر z معرف نوع مصالح است. رابطه‌ی ارائه شده توسط جانبی در روش متحد مورد توجه قرار گرفته و برای تخمین میزان نشست استفاده از آن توصیه شده است. براساس طبقه‌بندی رفتاری خاک مبتنی بر نتایج q_c و f_s و u ، مقدار m معرف سختی خاک بوده که به q_c مرتبط است و شاخص z مربوط به انواع خاک‌ها براساس تمامی داده‌های CPT و $CPTu$ مشخص شده است. برای سنجش رابطه‌ی پیشنهادی در برآورد نشست، ۴۲ مورد از ۵۲ مورد عملی جمع‌آوری شده از منابع معتبر بررسی شد. مقادیر حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی با مقادیر نشست‌های اندازه‌گیری شده و همچنین مقادیر پیش‌بینی شده برای آنها، که حاصل روابط جانبی،

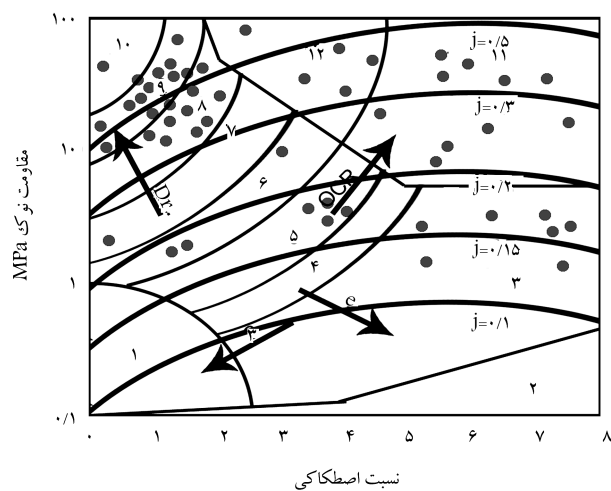


نسبت نشست پیش‌بینی شده به نسبت اندازه‌گیری شده

شکل ۱۰. منحنی‌های نرمال - لگاریتمی برای نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده برای روابط ارائه شده.



شکل ۱۱. منحنی فراوانی تجمعی برای نسبت نشست‌های پیش‌بینی شده به نشست‌های اندازه‌گیری شده.



شکل ۱۲. چارت رابرتسون به همراه زهای پیشنهادی و نقاط معادل موارد عملی.

۳. با بررسی نتایج حاصل از نمودارها مشخص شد که رابطه‌ی پیشنهادی برای تعیین میزان نشست در خاک‌های دانه‌بندی نسبت به خاک‌های چسبیده دارای کفایت بیشتری است. همچنین دقت پیش‌بینی‌ها در پی‌های تک نسبت به پی‌های نواری و گسترده بیشتر است.
۴. بررسی همزمان منحنی‌های نرمال و لگاریتمی-نرمال برای پیش‌بینی روش‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد میانگین نسبت نشست محاسبه‌شده به نشست اندازه‌گیری شده در رابطه‌ی پیشنهادی برابر ۱/۱۳، در روش جانبی برابر ۱/۴۹، در روش مایهوف برابر ۱/۶۶، و در روش اشمرتمن برابر ۱/۶۷ است. این مقایسه نشان می‌دهد که در بین روش‌های موجود رابطه‌ی پیشنهادی توانسته با انحراف استاندارد برابر ۲۹٪ نزدیک‌ترین مقدار را به نشست اندازه‌گیری شده پیش‌بینی کند. این در حالی است که میزان این انحراف در رابطه‌ی اشمرتمن برابر ۴۲٪، در رابطه‌ی مایهوف برابر ۷۷٪ و در رابطه‌ی جانبی برابر ۷۹٪ است.
۵. در مجموع براساس روابط تنش-کرنش جانبی و مقادیر اصلاح‌شده مدول توان تنش و نوع مصالح و سختی خاک براساس روش پیشنهادی می‌توان از آن به‌عنوان جایگزینی برای محاسبات نشست با هدف تخمین مقادیر واقعی‌تر در مهندسی ژئوتکنیک استفاده کرد.
۱. در رابطه‌ی پایه‌ی جانبی به هرکدام از حالات مختلف خاک محدوده‌ی بسیار وسیعی از مقدار m اختصاص داده شده، و نیز استفاده از تنها دو مقدار صفر و ۰/۵ برای تمامی حالت‌های خاک باعث به وجود آمدن خطا در نتایج محاسبات نشست می‌شود و نمی‌توان از آن به‌عنوان یک رابطه‌ی جامع استفاده کرد. به‌عنوان مثال حدود تغییرات m در خاک رس بین ۵ تا ۶۰ است و استفاده از این گستره‌ی وسیع مقادیر نشست محاسبه‌شده را دستخوش تغییرات بزرگی می‌کند.
۲. رابطه‌ی پیشنهادی با در نظر گرفتن ضریب‌های مؤثر در نشست (از جمله فشار وارده از طرف سربار، عرض پی، محدوده‌ی تأثیر و سختی خاک)، تعیین نوع خاک بر مبنای داده‌های CPT و $CPTu$ (اعم از q_c ، f_s و u) و نیز تعیین سختی خاک بر مبنای مقادیر حاصل از آزمایش CPT و استفاده از چارت طبقه‌بندی رفتاری خاک (چارت رابرتسون)، قادر به پیش‌بینی میزان نشست ۳۰ مورد پی تک، ۵ مورد پی نواری و ۷ مورد پی گسترده با نسبت متوسط مناسب است.

منابع

- Coduto, D.P., *Foundation Design: Principles and Practices*, 2nd ed., Prentice Hall, 883 p, (2001).
- Lunne, T.; Robertson, P. and Powell, J.J., *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic and professional, 191 p, (1997).
- Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W., *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif (1990).
- Chen, B. and Mayne, P. "Type 1 and 2 piezocone evaluations of over consolidation ratio in clays", *Proceedings of CPT 95*, **2**, pp. 141-148 (1995).
- Sully, H., Campanella, R. and Robertson, P.K., Interpretation of Penetration Pore Pressure to Evaluate Stress History in Clays, pp. 993- 999 (1988).
- Meigh, A.C., *Cone Penetration Testing Methods and Interpretation*, Balkema, 135p (1987).
- Simonini, P. and Cola, S. "Use of piezocone to predict maximum stiffness of venetion soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(4) (2000).
- Schmertmann, J.H., *Guidelines for Cone Test, Performance and Design*, Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78209, Washington, 145 p, (1978a).
- Meyerhof, G. "Bearing capacity and settlement of pile foundations", *Journal of the Geotechnical Engineering Div., proceedings of the American society of civil Engineering*, ASCE **102**, (GT3), pp. 195-228 (1976).
- Janbu, N., *Settlement Calculations Based on the Tangent Modulus Concept*, University of Trondheim, Norwegian Institute of Technology, Bulletin (2), 57 p, (1967).
- Canadian Foundation Engineering Manual*, CFEM, Third Edition Canadian Geotechnical Society, 512 P, (1992).
- Eslami, A. and Gholami, M. "Analytical model for the ultimate bearing capacity of foundations from cone resistance", *International Journal of Science and Technology Scientia IRANICA*, **13**(3), pp. 223-233 (2006).
- Briaud, J.L. and Gibbens, R.M. "Behavior of five large spread footing on sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(9), pp. 787-796 (1994).
- Robertson, P.K. "Soil classification using the cone penetration test", *Canadian Geotechnical Journal*, **27**(1), pp. 151-158 (1990).
- Eslami, A. and Fellenius, B. "Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories", *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, pp. 886-904 (1997).
- Eslami, A. and Fellenius, B. "CPT and CPTu data for profile interpretation: Review of methods and a proposed new approach", *Iranian Journal of Science and Technology*, **28**(B1), pp. 69-86 (2004).

