

روش کار بردی برای تحلیل روان‌گرایی با استفاده از داده‌های آزمایش نفوذ مخروط (CPTu)

محمدرضا کنگرانی فراهانی (کارشناس ارشد)
دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

محمد مهدی احمدی (دانشیار)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

ابوالفضل اسلامی (دانشیار)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

روانگرایی خاک‌ها در هنگام وقوع زلزله می‌تواند خسارات فراوانی را به همراه داشته باشد. در گذشته، روش‌های متعددی برای ارزیابی روان‌گرایی بر مبنای نتایج آزمایش‌های صحرایی ارائه شده است. در این میان، آزمایش نفوذ مخروط (CPT) به دلیل ثبت پیوسته و دقیق داده‌ها مقبولیت گسترده‌ی یافته است. در این تحقیق روش‌های تحلیلی و تشریحی برآورد روان‌گرایی با استفاده از نتایج CPT در 10° ساختگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به پیچیدگی روش‌های ارزیابی روان‌گرایی که در گذشته ارائه شده اند، با معرفی ناحیه خاک‌های مستعد روان‌گرایی بر روی نمودارهای طبقه‌بندی رفتاری خاک رابرتسون (۱۹۹۰) و اسلامی - فلنیوس (۲۰۰۴) روشی پیشنهاد شده است که می‌تواند خاک‌های با پتانسیل بالا برای روان‌گرایی را با سرعت و دقت کافی مشخص کند.

واژگان کلیدی: روان‌گرایی، مقاومت نوک مخروط، ماسه، فشار منفذی، طبقه‌بندی رفتاری خاک.

مقدمه

آزمایش نفوذ مخروط (CPT) به عنوان یکی از آزمایش‌های مهم صحرایی برای شناسایی خاک‌های قابل نفوذ، مقبولیت گسترده‌ی یافته است. نفوذسنج استاندارد دارای نوک مخروطی با مساحت پایه‌ی 10 cm^2 (قطر = 3.57 میلی‌متر) و زاویه‌ی رأس نوک 60° درجه است. جداری اصطکاکی در پشت نوک مخروطی واقع شده و دارای مساحت جانبی 150 cm^2 است.

در این آزمایش، مخروط با سرعت ثابت 20 mm/s به درون زمین رانده می‌شود. هنگام رانده شدن داده‌های بسیار خوب و پیوسته‌ی از مقاومت نوک مخروط (q_c) و اصطکاک جداری (f_s) اندازه‌گیری می‌شوند و از این طریق نوع خاک و مشخصات مکانیکی آن تعیین می‌شود. طی آزمایش نفوذ مخروط همچنین فشار منفذی هنگام آزمایش و در صورت نیاز محو آن هنگام توقف نیز اندازه‌گیری می‌شود. همچنین از طریق این آزمایش می‌توان سرعت موج برشی خاک را، که کاربردهای آن در مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ی افزایش یافته، تعیین کرد.^[۱]

این نوشتار به ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک بر مبنای نتایج آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری فشار منفذی (CPTu) می‌پردازد. «روان‌گرایی مصالح دانه‌ی» به انتقال از حالت جامد به حالت روان (مایع) و در نتیجه، افزایش فشار آب منفذی و

کاهش تنش مؤثر بر اثر تکان‌های لرزه‌ی گفته می‌شود. امروزه به‌طور عام، روش‌های ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی یک ساختگاه در دو دسته‌ی روش‌های تحلیلی و روش‌های تشریحی طبقه‌بندی می‌شوند.

داده‌های روان‌گرانشده و روان‌گرانشده از 10° ساختگاهی که در یک دهه‌ی گذشته در آن‌ها زلزله رخ داده است و آزمایش نفوذ مخروط نیز در این ساختگاه‌ها انجام شده، جمع‌آوری شده است. در ادامه، ابتدا خلاصه‌وار به تشریح برخی از روش‌های متداول در تحلیل روان‌گرایی می‌پردازیم و سپس با استفاده از داده‌ها، آنها را تحلیل خواهیم کرد. نهایتاً روشی جدید بر پایه‌ی استفاده از نمودارهای طبقه‌بندی خاک و براساس داده‌های آزمایش نفوذ مخروط، برای ارزیابی روان‌گرایی ارائه می‌شود.

روش‌های تحلیلی ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی

روش‌های تحلیلی ارزیابی روان‌گرایی، روش‌هایی هستند که با محاسبه‌ی ضریب اطمینان به ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی می‌پردازند. در صورتی که ضریب اطمینان محاسبه‌شده کوچک‌تر از ۱ باشد، خاک مستعد روان‌گرایی است و در غیر این صورت

خاک روان‌گرا نخواهد شد. نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب اطمینان عبارت است از:

$$FSL = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

که در آن CRR نسبت مقاومت دوره‌ی ۲ و CSR نسبت تنش دوره‌ی ۳ است. مقدار CSR به‌طور کلی مطابق رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید: [۲]

$$CSR = \left(\frac{\tau_{ave}}{\sigma'_{v0}} \right) = 0.165 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d \quad (2)$$

که در آن a_{max} شتاب بیشینه‌ی افقی تولیدشده بر اثر زلزله در سطح زمین، g شتاب ثقل، σ'_{v0} به ترتیب تنش‌های سربار قائم کل و مؤثر، و r_d ضریب کاهش تنش است که تابعی از عمق است. برای محاسبه‌ی CRR نیز روش‌های متعددی ارائه شده است که در ادامه تعدادی از آن‌ها معرفی می‌شوند.

روش سید [۳]

این روش با استفاده از همبستگی بین نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) و CPT ارائه شد بدین ترتیب که منحنی‌های $CRR_{V,5}$ به‌ازای تعداد ضربات آزمایش SPT به منحنی‌های $CRR_{V,5}$ متناظرشان از مقادیر تصحیح شده مقاومت نوک مخروط CPT تبدیل شده‌اند. (اندیس ۷/۵ نشان‌گر بزرگی زلزله برابر با ۷/۵ M_w است).

برای استفاده از این روش مطابق شکل ۱ عمل می‌شود. محور افقی نمودار ارائه‌شده در این شکل نماینده‌ی q_{c1} است که مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

$$q_{c1} = \frac{1.8}{0.8 + \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)} \cdot q_c \quad (3)$$

در این رابطه q_c مقاومت نوک اندازه‌گیری شده برحسب MPa، q_{c1} مقاومت نوک تصحیح‌شده، σ'_{v0} تنش مؤثر عمودی سربار برحسب kPa و P_a تنش مرجع برابر با ۱ اتمسفر یا ۱۰۰ kPa است. همچنین مقدار q_{c1} به‌دست آمده را می‌توان برای ریزدانه‌ی موجود تصحیح کرد، زیرا ریزدانه‌ها مقاومت خاک در برابر روان‌گرایی را افزایش می‌دهند. این تصحیح مطابق رابطه‌ی ۴ انجام می‌گیرد:

$$q_{c1f} = q_{c1} + \Delta q_{c1} \quad (4)$$

که در آن Δq_{c1} تصحیح ریزدانه و q_{c1f} مقاومت نوک تصحیح‌شده برای درصد ریزدانه‌هاست. نهایتاً از شکل ۱ و با توجه به مقدار CSR و منحنی $CRR_{V,5}$ مناسب (با توجه به اندازه‌ی متوسط قطر دانه‌ها، D_{50}) روان‌گرایی یا عدم روان‌گرایی لایه‌ی خاک را می‌توان تعیین کرد. [۳]

روش سوزوکی [۶]

روش سوزوکی بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش نفوذ مخروط در ۶۸ ساختگاه کشور ژاپن، پایه‌ریزی شده است و محاسبه‌ی شاخص رفتار نوع خاک (I_c) و مقاومت نوک مخروط تعدیل‌شده با ضریب f - که تابعی از شاخص رفتار نوع خاک است - را شامل می‌شود. چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود یک منحنی روان‌گرایی $CRR_{V,5}$ بر مبنای مقاومت نوک تعدیل‌شده با I_c خاک، توسط سوزوکی و همکاران ارائه شده است. در این روش، مقاومت نوک اندازه‌گیری شده نخست برای فشار سربار، براساس رابطه‌ی ۵ تصحیح می‌شود:

$$q_{c1} = \frac{q_c}{P_a} \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

تصحیح مقاومت نوک برای درصد ریزدانه‌ها نیز مطابق با روش سید صورت می‌گیرد. شاخص رفتار نوع خاک، مطابق روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود که در آنها f_s اصطکاک جداري اندازه‌گیری شده و R_f نسبت مقاومت جداري است.

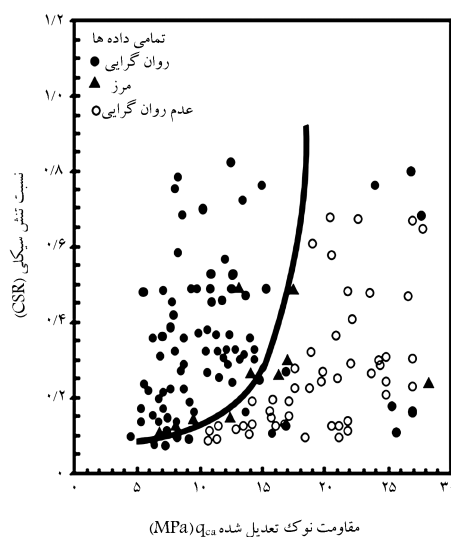
$$I_c = \left[(3.747 - \log Q)^2 + (\log R_f + 1.22)^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

$$Q = \frac{q_{c1f} - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad \text{و} \quad R_f = \frac{f_s}{(q_{c1f} - \sigma'_{v0})} \cdot (L) 10^5 \quad (7)$$

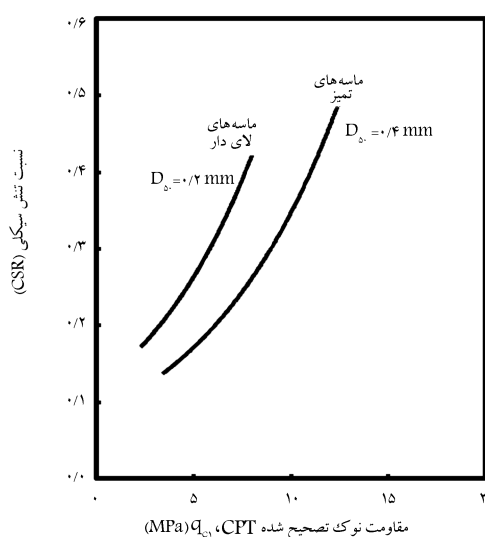
تعدیل مقدار q_{c1f} با استفاده از رابطه‌ی ۸ صورت می‌گیرد.

$$q_{ca} = q_{c1f} \cdot f(I_c) \quad (8)$$

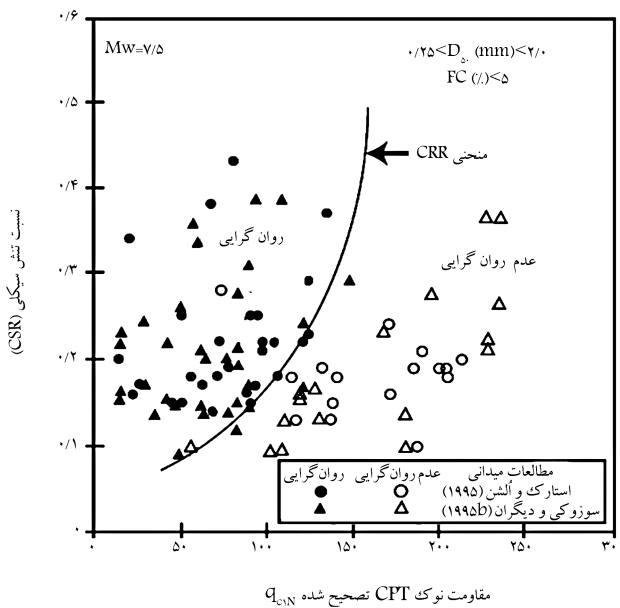
که در آن q_{ca} مقاومت نوک تعدیل‌شده و $f(I_c)$ تابعی از مقدار I_c است. در نهایت مطابق شکل ۲ می‌توان با استفاده از مقاومت نوک تعدیل‌شده و مقدار CSR و نیز با توجه به منحنی $CRR_{V,5}$ ، روان‌گرایی یا عدم روان‌گرایی لایه‌ی خاک را تعیین کرد. [۴]



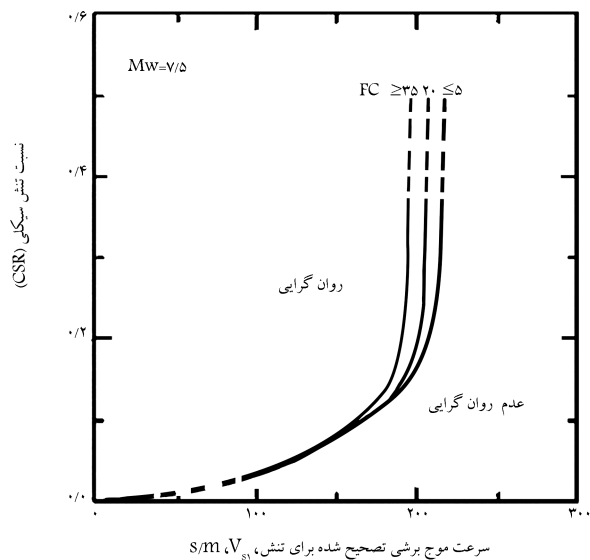
شکل ۲. نمودار تعیین قابلیت روان‌گرایی براساس روش سوزوکی. [۴]



شکل ۳. نمودار تعیین قابلیت روان‌گرایی براساس روش سید. [۳]



شکل ۳. نمودار تعیین قابلیت روان‌گرایی براساس روش رابرتسون - راید [۵].



شکل ۴. نمودار تعیین قابلیت روان‌گرایی با استفاده از نتایج سرعت موج برشی براساس روش اندروس [۷].

روان‌گرایی بر مبنای نتایج سرعت موج برشی V_s توسط محققین مختلفی ارائه شده است که نمونه‌ی از این نمودارها در شکل ۴ مشاهده می‌شود. [۷]

با مقایسه‌ی منحنی‌های CRR حاصل از نتایج سرعت موج برشی و نتایج آزمایش نفوذ مخروط (شکل‌های ۳ و ۴) می‌توان تناظر یک‌به‌یکی میان مقادیر q_{c1n} و $(V_{s1})_{cs}$ ایجاد کرد. محاسبه‌ی $(V_{s1})_{cs}$ طبق رابطه‌ی ۱۶ انجام می‌شود:

$$(V_{s1})_{cs} = k_{cs} \cdot V_{s1} = k_{cs} \cdot V_s \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (16)$$

که در آن ضریب اصلاح ریزدانه‌ها و تابعی از FC است، V_s سرعت موج برشی و V_{s1} سرعت موج برشی تصحیح شده است. همچنین از مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های درجا در ساختگاه‌هایی که هم آزمایش نفوذ مخروط در آن‌ها انجام شده و هم سرعت موج برشی در آن‌ها به دست آمده بود، رابطه‌ی بین V_s و نتایج آزمایش نفوذ مخروط

روش رابرتسون^۷-راید^۸ و روش تصحیح شده [۶۵]

این روش که در سال ۱۹۹۷ توسط مرکز ملی تحقیقات مهندسی زلزله (NCEER)^۹ منتشر شد، همانند روش سوزوکی از شاخص رفتار نوع خاک (I_c) بهره می‌برد. [۵] برای یافتن I_c صحیح از یک روند تداخلی استفاده شده که اگرچه محاسبات دستی را در این روش کند می‌کند، برای استفاده در نرم‌افزار مطلوب است. نحوه‌ی استفاده از این روش مطابق رابطه‌ی ۹ است:

$$Q = \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad \text{و} \quad R_f = \frac{f_s}{(q_{c1f} - \sigma'_{v0})} \cdot (\%)^{10} \quad (9)$$

نمای تنش (n) در رابطه‌ی ۹ بستگی به نوع خاک دارد که برای خاک‌های رسی مقدار آن برابر با ۱، برای خاک‌های سیلتی برابر ۰.۷ و برای خاک‌های ماسه‌یی برابر با ۰.۵ است که یک روند تداخلی برای ارزیابی I_c و n نیاز است.

ابتدا با این فرض که خاک رسی است، $n = 1$ فرض می‌شود و محاسبه‌ی I_c با استفاده از رابطه‌ی ۶ صورت می‌گیرد. سپس مقاومت نوک با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ تصحیح می‌شود.

$$q_{c1n} = \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (10)$$

تصحیح ریزدانه‌ها مطابق رابطه‌ی ۱۱ انجام می‌گیرد.

$$(q_{c1n})_f = K_c \cdot q_{c1n} \quad (11)$$

که برای $I_c < 1.64$ ، $K_c = 1.0$ و $I_c > 1.64$ داریم:

$$K_c = -0.403 I_c^2 + 0.581 I_c - 2.163 I_c + 3.775 I_c - 17.88 \quad (12)$$

ضمناً در روش اصلاحی رابرتسون - راید [۶] رابطه‌ی ۱۱ تصحیح شده $(q_{c1n})_f$ با استفاده از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$(q_{c1n})_f = q_{c1n} + \Delta q_{c1n} \quad \text{و} \quad \Delta q_{c1n} = \frac{K_c}{(1 - K_c) q_{c1n}} \quad (13)$$

که در آن K_c تابعی از درصد ریزدانه (FC) است و FC نیز به مقدار I_c بستگی دارد. در انتها $CRR_{V,5}$ از نمودار شکل ۳ به دست می‌آید که این منحنی به صورت تقریبی دارای رابطه‌ی ۱۴ است:

اگر $(q_{c1n})_f < 50$ آنگاه:

$$CRR_{V,5} = 0.823 \left[\frac{(q_{c1n})_f}{1000} \right] + 0.05 \quad (14)$$

و اگر $50 < (q_{c1n})_f < 160$ آنگاه:

$$CRR_{V,5} = 93 \left[\frac{(q_{c1n})_f}{1000} \right]^2 + 0.08 \quad (15)$$

روش اندروس^{۱۰}، همبستگی بین نتایج $CPTu$ و V_s [۷]

از نتایج آزمایش‌های درجا نظیر آزمایش نفوذ مخروط لرزه‌یی (SCPTu)، آزمایش لرزه‌یی بین چاهی (Crosshole) و آزمایش لرزه‌یی درون چاهی (Downhole)، در ساختگاه‌هایی که دچار روان‌گرایی شده بودند، نمودارهایی به منظور ارزیابی پتانسیل

برای ماسه‌های تمیز مطابق رابطه‌ی ۱۷ به دست آمده است: [۷]

$$(V_{s1})_{cs} = B_1 [(q_{c1n})_{cs}]^{B_2} \quad (17)$$

$$B_1 = 62.76 \pm 17.8 \quad \text{و} \quad B_2 = 0.231 \pm 0.060 \quad (18)$$

که در آن $(V_{s1})_{cs}$ برحسب متر بر ثانیه و $(q_{c1n})_{cs}$ بی بعد است. با توجه به نتایج به دست آمده از ساختگاه‌هایی که دچار روان‌گرایی شده بودند و سرعت موج برشی نیز در آن‌ها اندازه‌گیری شده بود، رابطه‌ی به دست آمد که با ترکیب آن با رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ و با فرض این که $B_2 = 0.231$, $B_1 = 62.76$ نهایتاً معادله‌ی ۱۹ برای تعیین مقدار $CRR_{V,5}$ ارائه شد. [۷]

$$CRR_{V,5} = 0.0086 [(q_{c1n})_{cs}]^{0.231} + 2.18 \left[\frac{1}{(215 - 62.76 [(q_{c1n})_{cs}]^{0.231})} - \frac{1}{215} \right] \quad (19)$$

روش‌های تشریحی ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی

روش‌های تشریحی به آن دسته از روش‌هایی اطلاق می‌شود که با بررسی پارامترهای مشخصی از خاک، مثل مقاومت الکتریکی، قابلیت اتساع، چگالی نسبی و برخی پارامترهای دیگر خاک از قبیل فشار منفذی اضافی (u) در حین نفوذ مخروط و یا مقاومت نوک مخروط، سعی در ارزیابی‌های اولیه‌ی پتانسیل روان‌گرایی می‌کنند. اغلب این روش‌ها به صورت مشخص و قطعی میزان پتانسیل روان‌گرایی را مشخص نمی‌کنند و تنها به بیان این نکته که خاک پتانسیل اولیه برای روان‌گرایی را دارد یا خیر اکتفا می‌کنند.

ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی با استفاده از آزمایش نفوذ مخروط

ارتعاشی (VCPTu) [۸]

آزمایش نفوذ مخروط ارتعاشی، یکی از انواع توسعه‌یافته‌ی آزمایش نفوذ مخروط است که با یک قسمت مرتعش‌کننده تجهیز شده و این قسمت اضافی امکان بررسی پتانسیل روان‌گرایی را به صورت مستقیم و البته تشریحی فراهم می‌کند. در آزمایش ارتعاشی نفوذ مخروط، اندازه‌گیری‌های ایستا هم‌زمان با اندازه‌گیری‌های پایا انجام می‌پذیرد و از مقایسه‌ی مقاومت ایستای نوک با مقاومت پایای آن برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی استفاده می‌شود. رابطه‌ی ۲۰ از جمله روابطی است که برای ارزیابی روان‌گرایی به کار می‌رود. بدین ترتیب اگر مقدار R_{ds} کم‌تر از ۰٫۲ باشد نهشته‌ی پتانسیل بالایی برای روان‌گرایی دارد. در رابطه‌ی ۲۰، q_{cd} مقاومت پایای نوک و q_c مقاومت ایستای نوک است. [۸]

$$R_{ds} = \frac{q_{cd}}{q_c} \quad (20)$$

ارزیابی روان‌گرایی از طریق آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری

مقاومت الکتریکی (RCPTu) [۹]

یکی از انواع پیشرفته‌ی CPT آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی (RCPTu) است که نوعی آزمایش نفوذ مخروط مجهز برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک است. پارامتر D که به عنوان پارامتر اتساع شناخته می‌شود، به وسیله‌ی روابطی و با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

قابل محاسبه است. محققین پارامتر D را برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی معرفی کردند. [۹] با توجه به این که پارامتر D به تخلخل خاک (n) بستگی دارد، اگر $D < 1$ آنگاه تخلخل ماسه‌ی دست‌نخورده کم‌تر از ماسه‌ی دست‌خورده است و در نتیجه ماسه اتساعی است، یعنی متراکم است و پتانسیل کمی برای روان‌گرایی دارد. اما اگر $D > 1$ آنگاه تخلخل ماسه‌ی دست‌نخورده بیشتر از ماسه‌ی دست‌خورده است و در نتیجه ماسه انقباضی است، یعنی شل است و پتانسیل روان‌گرایی دارد.

ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی با استفاده از شاخص Q_{tn}

رفتار اتساعی ماسه به وسیله‌ی مواد معدنی، ضرایب اندازه‌دانه‌ها، چگالی درجا و فشار محصورکننده تحت تأثیر قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود عوامل مؤثر بر رفتار اتساعی خاک بر مقدار توان باربری اندازه‌گیری شده نوک مخروط نیز اثر بگذارند، هرچند مشخص نیست این دو به یک شیوه تحت تأثیر قرار بگیرند. برای نرمالیزه کردن توان باربری از رابطه‌ی ۲۱ استفاده می‌شود: [۹]

$$q_{tn} = \frac{q_t}{(\sigma'_v)^{0.65}} \quad (21)$$

که در آن q_{tn} تنش باربری کل نرمالیزه‌شده‌ی مخروط و q_t تنش باربری کل مخروط بعد از تصحیح فشار منفذی است. در یکی از مطالعه‌های انجام شده، [۹] ضمن بررسی چندین سایت که آزمایش نفوذ مخروط مقاومت‌سنج در آنها انجام شده بود، با ارائه‌ی نموداری برحسب q_{tn} و D مرز بین اتساع - انقباض حدود $55bar$ به دست آمد یعنی: $q_{tn} = 55bar$ در $D = 1$. براین اساس پیشنهاد شد اگر $q_{tn} < 55bar$ آنگاه ماسه رفتار انقباضی دارد و شل محسوب می‌شود و در نتیجه پتانسیل روان‌گرایی دارد، اما اگر $q_{tn} > 55bar$ ، ماسه رفتار اتساعی دارد و به عنوان ماسه‌ی متراکم شناخته می‌شود.

مطالعات موردی [۱۰]

برای بررسی روش‌های ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی، به نتایج آزمایش نفوذ مخروط در سایت‌هایی نیاز بود که در هنگام زلزله برخی از آن‌ها دچار روان‌گرایی شده بودند و در برخی دیگر روان‌گرایی رخ نداده بود. بدین منظور داده‌های آزمایش‌های نفوذ مخروط در ۱۰ ساختگاه مختلف که زلزله در آن‌ها رخ داده بود جمع‌آوری شد. با توجه به این که بر اثر افزایش عمق پتانسیل روان‌گرایی کاهش می‌یابد، داده‌ها حداکثر تا عمق ۱۰ متری از سطح زمین و با فواصل ۲۰ سانتی‌متری در عمق نسبت به یکدیگر استخراج شدند. لایه‌هایی که شامل خاک‌های رسی بودند از میان داده‌ها حذف شدند، سپس داده‌های این آزمایش‌ها برای مقایسه‌ی روش‌های تحلیلی ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی که پیش‌تر ذکر شد و نیز در ارائه‌ی ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی بر روی نمودارهای طبقه‌بندی خاک مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۱ خلاصه‌ی از مشخصات این موارد عملی معرفی شده است.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی ارزیابی

روان‌گرایی با داده‌های مطالعات موردی

داده‌های به دست آمده از ۱۰ ساختگاه معرفی شده در بخش قبل با استفاده از ۵ روش معرفی شده برای ارزیابی روان‌گرایی شامل روش سید، [۱۱] روش سوزوکی، [۱۲]

جدول ۱. خلاصه مشخصات موارد عملی.

ردیف	نام آزمایش*	محل سایت و مرجع	a_{max} g	M_w	γ (kn/m^2)	D_{50} (mm)	آزمایش‌های درجای انجام شده	پروفیل خاک	تراز آب زیرزمینی (m)
۱	CPT PS۵	آداپازاری، ترکیه ^[۱۰]	۰٫۳۷	۷٫۴	۱۷٫۲	۱٫۶	SPT,CPTu	(SM)	۱
۲	CPT SF۵	آداپازاری، ترکیه ^[۱۰]	۰٫۴	۷٫۴	۱۶٫۹	۱٫۶	SPT,CPTu	(SM)	۱
۳	CPT YH۳	آداپازاری، ترکیه ^[۱۰]	۰٫۳۷	۷٫۴	۱۷٫۷	۰٫۲۹	SPT,CPTu	(SP-SM)	۱
۴	CPT C۴	آداپازاری، ترکیه ^[۱۰]	۰٫۴	۷٫۴	۱۸٫۲	۰٫۱۲	SPT,CPTu	SM to ML	۰٫۴۴
۵	CPT E۸	آداپازاری، ترکیه ^[۱۰]	۰٫۴	۷٫۴	۱۷٫۸۷	۰٫۵۱	SPT,CPTu	(SP)	۰٫۵
۶	CPT F۱	آداپازاری، ترکیه ^[۱۰]	۰٫۴	۷٫۴	۱۷٫۹	۰٫۰۹	SPT,CPTu	(SM)	۰٫۵
۷	NT۱	نانتو، تایوان ^[۱۱]	۰٫۳۸	۷٫۶	۱۸٫۵	۰٫۰۸	SPT,SCPTu	(SP-SM)	۱
۸	WF۴	وونگ، تایوان ^[۱۱]	۰٫۶	۷٫۶	۱۸٫۵	۰٫۱۷	SPT,SCPTu	(SM)	۱٫۲
۹	YL۲	یوان لین، تایوان ^[۱۱]	۰٫۲۵	۷٫۶	۱۸٫۵	NA	SPT,SCPTu	(SP)	۰٫۵۶
۱۰	LW-C۱	چنگ بین، تایوان ^[۱۱]	۰٫۴	۷٫۵	۱۹٫۵	NA	SPT,SCPTu	(SP-SM)	۱

a_{max} شتاب بیشینه افقی؛ NA غیر موجود؛ γ وزن مخصوص؛ D_{50} قطر متوسط دانه‌ها (میلی متر)؛ M_w بزرگی زلزله.

* از آنجا که در هر ساختگاه چندین آزمایش انجام شده بود لذا در این جدول نام آزمایش مربوطه برای جست‌وجوی ساده‌تر در مرجع مربوطه درج شده است.

تمامی روش‌های مذکور از توانایی خوبی برای ارزیابی روان‌گرایی برخوردار هستند. این روش‌ها به دو علت توانسته‌اند به خوبی از عهده‌ی تشخیص روان‌گرایی برآیند. علت نخست آن است که برای ساختگاه‌های مورد نظر شدت زلزله به اندازه‌ی کافی زیاد است و در نتیجه مقدار CSR افزایش یافته و باعث می‌شود که به خصوص برای مقادیر کوچک q_c ، فاصله‌ی داده تا منحنی CRR افزایش یابد و سبب شود که داده‌های کم‌تری در مرز روان‌گرایی - عدم روان‌گرایی قرار گیرند.

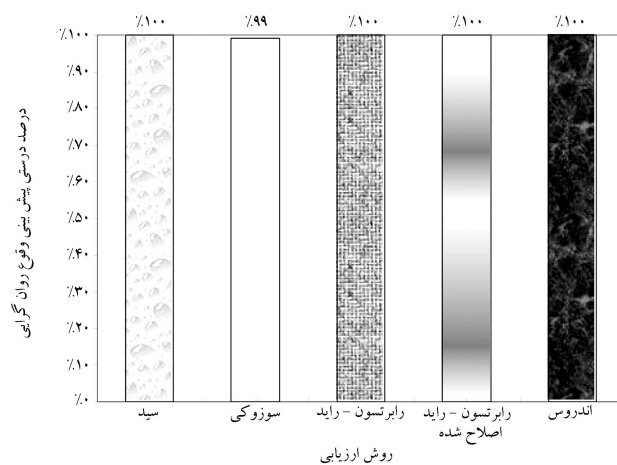
اما علت دوم را باید در ارائه‌ی منحنی‌های CRR و نیز نحوه‌ی تصحیح q_c جست‌وجو کرد. به‌طور کلی هرچه منحنی‌های CRR بیشتر به سمت راست نمودار کشیده شوند امکان این که علاوه بر داده‌های روان‌گرا شده، داده‌های غیر قابل روان‌گرا نیز توسط روش‌های تحلیلی به‌عنوان داده‌های با قابلیت روان‌گرایی تشخیص داده شوند بیشتر است. بدین ترتیب هرچند داده‌های روان‌گرایی فراوانی به‌درستی پیش‌بینی می‌شوند اما این امکان وجود دارد که داده‌های غیر قابل روان‌گرا نیز به‌اشتباه، داده‌های با قابلیت روان‌گرایی معرفی شوند. لذا در مرحله‌ی بعدی به بررسی این موضوع، یعنی بررسی میزان محافظه‌کاری روش‌های یادشده خواهیم پرداخت. یعنی بررسی خواهیم کرد که در یک لایه مشخص روان‌گرایی رخ نداده باشد و روش هم پیش‌بینی عدم وقوع روان‌گرایی را داشته باشد. نتایج بررسی لایه‌های روان‌گرا نشده که توسط این روش‌ها مورد تحلیل روان‌گرایی قرار گرفته‌اند در شکل ۶ مشاهده می‌شود. نمودار یادشده درصد درستی پیش‌بینی عدم وقوع روان‌گرایی را برای هر روش نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل ۶ مشخص است در بین روش‌های ذکرشده روشی که بهترین پیش‌بینی‌ها را انجام می‌دهد روش اصلاحی رابرتسون-راید^[۶] و پس از آن نیز به ترتیب روش رابرتسون-راید^[۵]، روش سوزوکی^[۴]، روش اندروس^[۷] و نهایتاً روش سید^[۳] قرار دارند.

یادآور می‌شود که نمودارهای فوق حاصل بررسی بیش از ۱۶۰ ورودی به‌دست آمده از ۱۰ ساختگاه است که این داده‌ها برای هر روش به‌صورت جداگانه مورد محاسبه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده از دو نمودار فوق نمایان‌گر نکته‌ی قابل توجهی است. چنان‌که پیش‌تر نیز ذکر شد روش سید از همبستگی بین آزمایش‌های نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط، و روش اندروس نیز با همبستگی بین نتایج سرعت موج برشی و آزمایش نفوذ مخروط ارائه شده‌اند. اما سه روش دیگر به‌صورت مستقیم از نتایج آزمایش نفوذ مخروط به دست آمده‌اند که نتایج بهتری

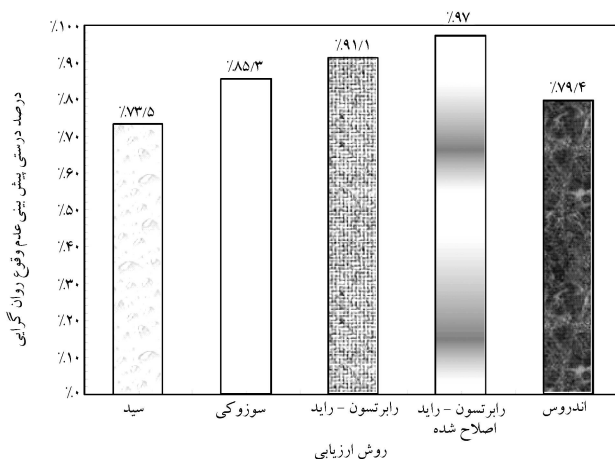
روش رابرتسون - راید^[۵]، روش اصلاحی رابرتسون - راید^[۶] و روش اندروس^[۷] مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در تحلیل‌های روان‌گرایی برای خاک‌های رسی ممکن است مقدار ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی (FSL) از نظر محاسبات عددی به کم‌تر از ۱ برسد، به‌این معنا که طبق تحلیل صورت‌گرفته خاک روان‌گرا می‌شود، اما شواهد زیادی وجود دارد که این خاک‌ها در شرایط بسیار محدودی قابلیت روان‌گرایی دارند.^[۱۲] بنابراین مطالعه‌ی روان‌گرایی این نوع از خاک‌ها در این تحقیق مدنظر نیست. برای ارزیابی روش‌های محاسبه‌ی روان‌گرایی از ۱۰ سایت که اطلاعات وقوع روان‌گرایی در آن‌ها وجود داشت کمک گرفته شد. به‌طور کلی به نظر می‌رسد تمامی روش‌های ذکرشده می‌توانند به خوبی پیش‌بینی‌های مناسبی از وقوع روان‌گرایی را ارائه دهند. مقایسه‌ی این روش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است.

چنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود پیش‌بینی وقوع روان‌گرایی برای تمامی داده‌های روان‌گرا شده به خوبی صورت گرفته، و فقط از روش سوزوکی و برای یک لایه (یک سری از داده‌ها) پیش‌بینی به‌درستی صورت نگرفته است. به بیان دیگر



شکل ۵. نمودار ستونی مقایسه میانگین درصد درستی پیش‌بینی وقوع روان‌گرایی.



شکل ۶. نمودار ستونی مقایسه‌ی درصد درستی پیش‌بینی عدم وقوع روان‌گرایی.

نسبت به دو روش پیشین از خود نشان می‌دهند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های مستقیم نتایج بهتری نسبت به روش‌های غیرمستقیم (یعنی روش‌های ارائه‌شده با ایجاد همبستگی) ارائه می‌دهند.

همچنین می‌توان به اهمیت تأثیر ریزدانه‌ها در پتانسیل روان‌گرایی پی برد. چنان که در روش رابرتسون - راید^[۵] و روش اصلاحی رابرتسون - راید^[۶] مشاهده می‌شود، تنها تفاوت این دو روش، که بهترین روش‌های ارزیابی روان‌گرایی معرفی شده‌اند، در تفاوت تصحیح مقدار ریزدانه‌ها با هم است اما نتایج ارزیابی این دو روش نشان می‌دهد که همین تصحیح مقدار ریزدانه‌ها چه تأثیر قابل ملاحظه‌ی در ارزیابی روان‌گرایی به جای می‌گذارد.

روش پیشنهادی بر مبنای نمودارهای طبقه‌بندی رفتاری خاک

چنان که در بخش ۲ مشاهده می‌شود تقریباً در تمامی روش‌های تحلیل ارزیابی روان‌گرایی، انجام محاسبات و تحلیل‌های طولانی ضروری است. بنابراین ارائه‌ی روشی که بتواند به سرعت و بدون انجام تحلیل‌های وقت‌گیر روان‌گرایی اطلاع نسبتاً دقیقی از میزان پتانسیل روان‌گرایی خاک‌های دانه‌ی ارائه‌کننده، مؤلفین این مقاله را بر آن داشت تا با ارائه‌ی ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی بر نمودارهای طبقه‌بندی خاک، این امکان را فراهم آورند. برای رسیدن به این هدف، تعیین ناحیه‌ی خاک‌های با قابلیت روان‌گرایی زیاد روی نمودارهای طبقه‌بندی خاک مورد توجه قرار گرفت.

اصولاً طبقه‌بندی رفتاری خاک براساس نتایج آزمایش CPT و CPTu موضوعی است که توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده، و نمودارهای گوناگونی برای طبقه‌بندی خاک با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط ارائه شده است.

تا سال ۲۰۰۲ حدود ۲۰ روش طبقه‌بندی خاک بر مبنای داده‌های آزمایش CPT و CPTu ارائه شدند و مورد نقد و ارزیابی قرار گرفتند.^[۱۳] از میان این روش‌ها، دو روش با توجه به مقبولیت و گستردگی استفاده برای معرفی ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی به کار گرفته شدند.^[۱۵،۱۴] این دو روش طبقه‌بندی خاک با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط ارائه شده‌اند. هرچند امکان ارائه‌ی چنین ناحیه‌ی در تمامی نمودارهای طبقه‌بندی خاک براساس نتایج آزمایش CPT نیز وجود دارد. در سال ۱۹۹۰ رابرتسون اصلاحی بر نمودارهای قبلی خود ارائه کرد و این بار نمودار خود را بر مبنای Q_t و R_f نرمالیزه شده ارائه کرد.^[۱۶] ناحیه‌های مربوط به نمودار به

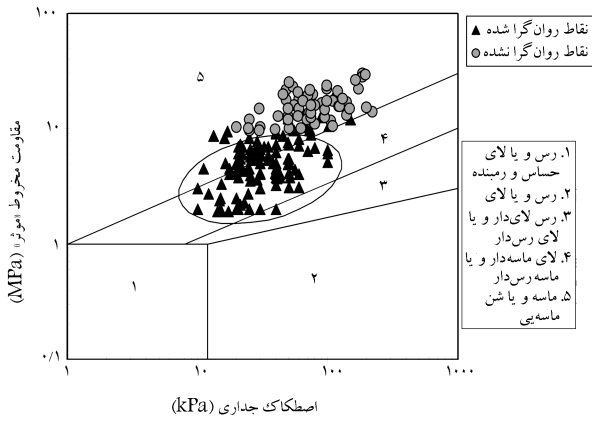
شرح زیر معرفی می‌شوند:

۱. خاک‌های حساس و ریزدانه؛
۲. خاک‌های آلی و تورب^{۱۴}؛
۳. رس‌ها (رس تا رس لای‌دار)؛
۴. مخلوط‌های لای‌دار (رس لای‌دار تا لای رسی)؛
۵. مخلوط‌های ماسه‌ی (لای ماسه‌ی تا ماسه‌ی لای‌دار)؛
۶. ماسه (ماسه‌ی لای‌دار تا ماسه‌ی تمیز)؛
۷. ماسه تا ماسه‌ی شن‌دار؛
۸. ماسه تا ماسه‌ی رسی بسیار متراکم؛
۹. خاک سمته‌شده یا بیش‌تحکیم و ریزدانه‌ی بسیار سخت.

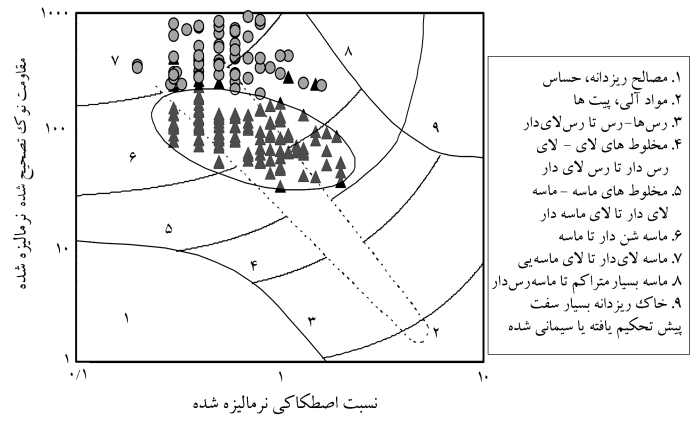
اما در سال ۲۰۰۴ محققین نموداری برای طبقه‌بندی خاک ارائه کردند^[۱۳] که رسم نمودار آن بر مبنای مقاومت مؤثر مخروط (q_E) در برابر اصطکاک جداری بود و $q_E = (q_t - u_t)$ ، مقاومت مؤثر مخروط (q_E) اگرچه در مصالح دانه‌ی تفاوت چندانی با مقاومت مخروط تصحیح‌شده (q_t) ندارد، اما در مصالح ریزدانه و به‌طور کلی مصالحی که مقدار q_t آن‌ها کوچک است تفاوت خود را به‌وضوح نشان می‌دهد و این نکته‌ی است که در سایر نمودارها به آن توجه نشده است. ضمناً مقایسه‌ی دو روش یادشده برای خاک‌های دانه‌ی و خاک‌هایی که مقاومت نوک بالاتری دارند سازگاری خوبی نشان می‌دهند.

تعیین ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی روی نمودارهای طبقه‌بندی خاک - و به‌طور مشخص نمودارهای رابرتسون (۱۹۹۰) و اسلامی - فلنیوس (۲۰۰۴) - بخش دیگری از تحقیقات انجام گرفته است. ابتدا داده‌های روان‌گرایی با استفاده از بهترین روش تحلیل روان‌گرایی، یعنی روش اصلاحی رابرتسون-راید، آنالیز شد و ضریب اطمینان آن‌ها در برابر روان‌گرایی برای زلزله‌ی با بزرگی معادل ۷/۵ محاسبه شد. داده‌های با ضریب اطمینان کم‌تر از ۱ به‌عنوان داده‌های روان‌گرایی، و داده‌های با ضریب اطمینان بزرگ‌تر از ۱ به‌عنوان داده‌های غیرقابل روان‌گرایی تعیین شدند. تحلیل‌های صورت‌گرفته بر روی این داده‌ها و نیز نتایج طبقه‌بندی خاک براساس این داده‌ها منجر به ایجاد نتایجی شد که در شکل ۷ مشاهده می‌شوند. چنان که در نمودار رابرتسون (۱۹۹۰) مشاهده می‌شود،^[۱۳] بیشترین تراکم داده‌ها بر روی قسمتی از نمودار است که در طبقه‌بندی خاک‌ها از آن به‌عنوان ماسه‌ی عادی تحکیم‌یافته نام برده می‌شود. در نمودار اسلامی - فلنیوس (۲۰۰۴) نیز بیشترین تراکم داده‌ها بر روی ناحیه‌ی است که از آن به‌عنوان ماسه‌ی سیلتی و ماسه‌های ریز نام برده می‌شود^[۱۳] که این ماسه‌های شل قابلیت بالایی برای روان‌گرایی دارند. به‌طوری که پیش‌تر نیز ذکر شد، داده‌های مربوط به خاک‌های رسی با توجه به شرایط بسیار محدودشان برای روان‌گرایی از سری داده‌ها حذف شده‌اند و بنابراین تنها داده‌های مربوط به خاک‌های دانه‌ی مورد توجه قرار گرفتند. با توجه به تراکم داده‌های روان‌گرایی بر روی هر دو نمودار (شکل ۷)، ناحیه‌ی به‌عنوان «ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی» معرفی می‌شود. نواحی به دست آمده از نمودارهای بالا در شکل ۸ به‌صورت مجزا نشان داده شده‌اند.

برای بررسی میزان درستی ناحیه‌ی معرفی‌شده و در نتیجه بررسی دقت روش پیشنهادی ارائه‌شده از یک سری جدید داده‌های روان‌گرایی با استفاده شد. باید توجه داشت که این داده‌ها در تعیین ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی به کار نرفته‌اند. داده‌های منتخب برای آزمون ناحیه‌ی پیشنهادی روان‌گرایی این خصوصیت را

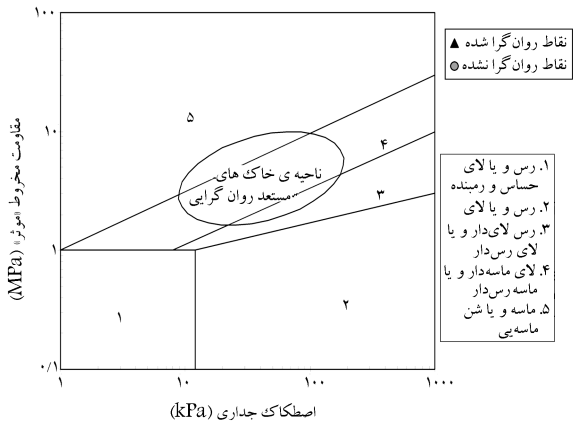


(ب) نمودار اسلامی، فلتیوس^[۳۳]

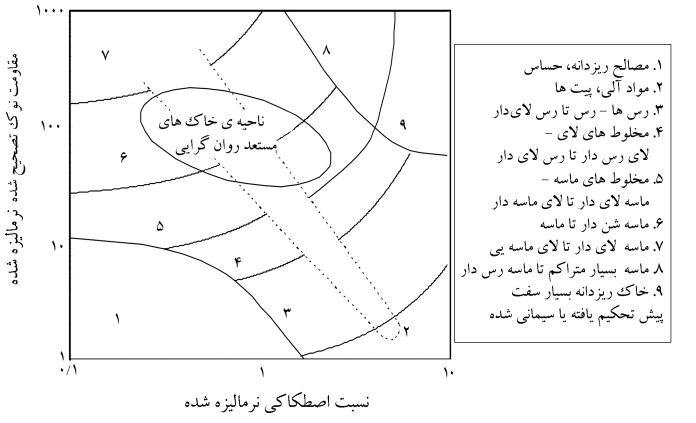


(الف) نمودار رابرتسون^[۳۳]

شکل ۷. توزیع داده‌های روان‌گرا شده.

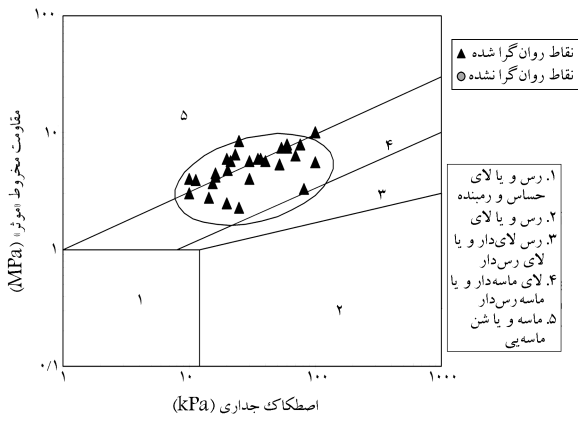


(ب) نمودار اسلامی، فلتیوس^[۳۳]

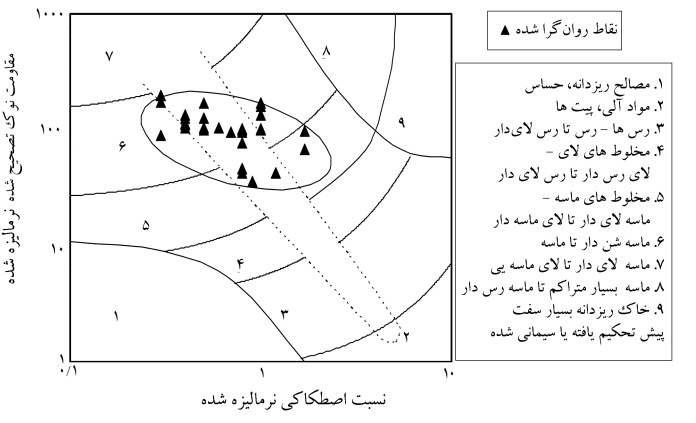


(الف) نمودار رابرتسون^[۳۳]

شکل ۸. نواحی خاک‌های با قابلیت بالای روان‌گرایی.



(ب) نمودار اسلامی، فلتیوس^[۳۳]



(الف) نمودار رابرتسون^[۳۳]

شکل ۹. آزمون درستی ناحیه‌ی پیشنهادی.

داشته‌اند و در نتیجه روش پیشنهادی به خوبی می‌تواند از عهده‌ی پیش‌بینی روان‌گرایی برآید.

نکته‌ی که باید بدان توجه داشت این است که این ناحیه برای زلزله‌یی با بزرگی ۷/۵ ارائه شده است و برای زلزله‌های با بزرگی متفاوت مسلماً ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی بر روی نمودارهای طبقه‌بندی خاک تفاوت خواهد کرد. لذا برای

دارند که اولاً تحت زلزله‌های رخ داده، برحسب مستندات گزارشات زلزله، روان‌گرا شده‌اند؛ ثانیاً ضریب اطمینان این نوع داده‌ها در برابر روان‌گرایی با استفاده از روش اصلاحی رابرتسون - رایید برای زلزله‌های با بزرگی ۷/۵، کم‌تر از ۱ محاسبه شده است. چنان که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، داده‌های جدید نشان می‌دهند که ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی در هر دو نمودار طبقه‌بندی خاک دقت خوبی

زلزله‌های با بزرگی‌های متفاوت از ۷/۵ باید تحقیقات بیشتری انجام بگیرد و در صورت لزوم نواحی دیگری ارائه شوند. البته چنان‌که در بخش ۲ نیز اشاره شد، سایر نمودارهای ارائه شده توسط محققین مختلف نیز برای زلزله‌یی با بزرگی ۷/۵ - به‌عنوان بزرگی مرجع - ارائه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

- با ملاحظه‌ی جنبه‌های اقتصادی و به دست آمدن نتایج قابل قبول و بهینه، و نیز میزان دقت پیش‌بینی‌ها، روش اصلاحی رابرتسون - راید^[۶] بهترین روش شناخته شد.
 - از آنجا که روش‌های سید^[۳] و اندروس^[۷] در پیش‌بینی عدم وقوع روان‌گرایی ضعیف عمل کرده و بسیار محافظه‌کارانه هستند، اگر طراحی‌های ژئوتکنیکی لرزه‌یی براساس آنها انجام پذیرد هزینه‌های اقتصادی بیشتری به‌همراه دارد.
 - روش‌های سید^[۳] و اندروس^[۷] دو روشی هستند که بیشترین محافظه‌کاری را دارند و هر دو با ایجاد همبستگی از آزمایش‌های درجای دیگر ارائه شده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از داده‌هایی که به‌طور مستقیم از آزمایش نفوذ مخروط به‌دست آمده‌اند نتیجه‌ی بهتری نسبت به داده‌های حاصل از همبستگی ارائه می‌دهد.
 - تعیین ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی روی دو نمودار رابرتسون^[۱۲] و اسلامی - فلنیوس^[۱۳] علاوه بر همراه داشتن نتایج منطقی، می‌تواند در ارزیابی‌های اولیه از روان‌گرایی بسیار مفید واقع شود. بدین ترتیب که اگر خاکی در این ناحیه‌ها واقع شده باشد دارای پتانسیل بالایی برای روان‌گرایی است این ناحیه عموماً دارای ماسه شل است که در صورت اشباع بودن بیشترین پتانسیل روان‌گرایی را دارا است.
 - ناحیه‌ی معرفی شده در نمودارهای طبقه‌بندی خاک عملاً برای زلزله‌یی به بزرگی ۷/۵ ارائه شده‌اند؛ به بیان دیگر هرچند اطلاعات دقیقی از مشاهده‌ی روان‌گرایی در سایت‌های مختلف وجود دارد، همه‌ی این داده‌ها با استفاده از روش تحلیلی رابرتسون - راید و برای زلزله‌یی با بزرگی ۷/۵، به‌عنوان بزرگی مرجع، که مورد استفاده سایر محققین نیز بوده است، مورد تحلیل قرار گرفتند. برای زلزله‌های با بزرگی متفاوت لازم است تحقیقات دیگری انجام گیرد و در صورت لزوم نواحی مرتبط با زلزله‌های با بزرگی مختلف ارائه شود.
 - انجام تحلیل‌های روان‌گرایی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از سایت‌هایی که دچار روان‌گرایی شده بودند نشان داد که روش پیشنهادی مبتنی بر طبقه‌بندی رفتاری خاک از دقت، قابلیت و نیز سرعت خوبی در ارزیابی روان‌گرایی برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان معیاری مناسب برای ارزیابی و شناخت کامل‌تر روان‌گرایی در مهندسی ژئوتکنیک و به‌عنوان مکمل روش‌های تحلیلی و تشریحی مورد استفاده قرار گیرد.
- با توجه به خطراتی که بر اثر روان‌گرایی در خاک و متعاقباً در سازه‌ها - به‌ویژه در مناطقی که دارای خاک‌های دانه‌یی اشباع شل هستند - رخ می‌دهد تحلیل روان‌گرایی از اهمیت ویژه‌یی برخوردار است. با انجام آزمایش‌ها و نیز تحلیل‌های روان‌گرایی که به‌لحاظ اقتصادی، در قیاس با زیان‌های احتمالی ناشی از خرابی سازه‌ها بر اثر زلزله، هزینه‌های بسیار کمی دارند می‌توان به میزان پتانسیل روان‌گرایی خاک پی برد. در این تحقیق، بررسی روش‌های ارزیابی روان‌گرایی مبتنی بر نتایج یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های درجای ژئوتکنیکی - یعنی آزمایش نفوذ مخروط - منجر به معرفی مناسب‌ترین روش تحلیلی ارائه شده برای ارزیابی روان‌گرایی شده است. همچنین با استفاده از انواع روش‌های تشریحی معرفی شده و نیز روش جدید ارائه شده برای ارزیابی روان‌گرایی، می‌توان بدون انجام تحلیل‌های وقت‌گیر روان‌گرایی ارزیابی‌های اولیه‌یی از روان‌گرایی انجام داد و در صورت لزوم از روش‌های تحلیلی بهره جست.
- برای انجام تحلیل‌های یادشده، ۱۰ آزمایش نفوذ مخروط از ۱۰ سایت مختلف انتخاب و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. تحلیل و بررسی‌ها بر روی این ۱۰ مورد عملی تا عمق ۱۰ متری و به‌ازای هر ۲۰ سانتی‌متر، با استفاده از ۵ روش مختلف ارزیابی روان‌گرایی، شامل روش‌های سید^[۳] سوزوکی^[۴]، رابرتسون - راید^[۵]، اصلاحی رابرتسون - راید^[۶] و اندروس^[۷] انجام شد. ضمناً برای انجام طبقه‌بندی رفتاری خاک و تعیین ناحیه‌ی خاک‌های مستعد روان‌گرایی نیز محاسبات و تحلیل‌های لازم صورت گرفت. نهایتاً خلاصه‌ی نتایج حاصل از تحقیق فوق عبارت است از:
- روش‌های تحلیلی آنالیز روان‌گرایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند در پیش‌بینی وقوع روان‌گرایی عملکرد خوب و مناسبی دارند، ولی در مورد پیش‌بینی عدم وقوع روان‌گرایی یا به‌بیان دیگر میزان محافظه‌کاری آنها باید دقت و توجه لازم اعمال شود.

پانویس

1. cone penetration test
2. cyclic resistance ratio
3. cyclic stress ratio
4. seed
5. standard penetration test
6. Suzuki
7. Robertson
8. Wride
9. national center of earthquake engineering reasearch
10. Andrus

11. vibropezocone
12. resistivity cone penetration test
13. case histories
14. peat

منابع

1. Youd, T.L., et al. "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction

- resistance of soils," *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **127**(10), pp. 817-33 (2001).
2. Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Simplified procedure for evaluation of soil liquefaction potential," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **97**(SM9), pp. 1249-1274 (1971).
 3. Seed, H.B. and De Alba, P. "Use of SPT and CPT test for evaluating the liquefaction resistance of soils," *Proceedings, Use of In-situ Tests in Geotechnical Engineering, ASCE*, pp. 1249-73 (1986).
 4. Suzuki, Y.; Koyamada, K. and Tokimatsu, K. "Prediction of liquefaction resistance based on CPT tip resistance and sleeve friction," *Proceeding XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany*, pp. 603-606 (1997).
 5. Robertson, P.K. and Wride, C.E. "Cyclic liquefaction potential and its evaluation based on the SPT and CPT," *Proceedings, Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance, NCEER-97-0022, Buffalo, NY*, pp. 41-87 (1997).
 6. Robertson, P.K. and Wride, C.E. "Evaluating Cyclic Liquefaction potential using the Cone Penetration Test," *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(3), pp. 442-459 (1998).
 7. Andrus, R.D.; Piratheepan, P.; Ellis, B.S.; Zhang, J.F. and Juang, C.H. "Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-Vs relationships," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, pp. 713-721 (2004).
 8. Tokimatsu, K. "Penetration tests for dynamic problems," *Penetration Testing 1 (Proceeding ISOPT-1)*, Balkema, Rotterdam, pp. 117-136 (1988).
 9. Campanella, R.G. and Kokan, M. "A new approach to measuring dilatancy in saturated sands," *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **16**(6) (1993).
 10. PEER. "Documenting incidents of ground failure resulting from the Aug, 17, 1999, Kocaeli, Turkey earthquake," (2000). WWW.http://peer.Berkeley.edu.
 11. Ku, C.S.; Lee, D.H. and Wu, J.H. "Evaluation of soil liquefaction in the Chi-Chi, Taiwan earthquake using CPT data," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, pp. 659-673 (2004).
 12. Youd, T.L. and Gilstrap, S.D. "Liquefaction and deformation of silty and fine-grained soils," *Proceeding of 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, Portugal*, **3**, pp. 1013-1020 (1999).
 13. Fellenius, B.H. and Eslami, A. "Soil profile interpreted from CPTu data," *Proceedings of Year 2000 Geotechnics Conference, Southeast Asian Geotechnical Society, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, November 27 - 30, 2000*, Editors Balasubramaniam, A.S., Bergado, D.T., Der-Gyey, L., Seah, T.H., Miura, K., Phien-wej, N. and Nutalaya, P., **1**, pp. 163-171 (2000).
 14. Robertson, P.K. "Soil classification using the cone penetration test," *Canadian Geotechnical Journal*, **27**(1), pp. 151-158 (1990).
 15. Eslami, A. and Fellenius, B.H. "CPT and CPTu data for soil profile interpretation: Review of methods and a proposed new approach," *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B*, **28**(B1), pp. 69-86 (2004).

