مقایسهٔ روش‌های آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (SPT) و سرعت موج برشی (Vs) در تعیین میزان خطر روان‌گرایی در امتداد خط ۲ متروی تبریز

دلارا اشنویه، روزبه دبیری*؛
دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۵/۱۰/۲۹ پذیرش ۹۶/۰۲/۲۶

چکیده

پس از وقوع روان‌گرایی، نشست‌هایی در سطح زمین و درون لایه‌های خاکی ایجاد می‌شود که سبب آسیب رساندن به سازه‌های مستقر بر روی آن‌ها یا سازه‌های مدفون و شریان‌های حیاتی می‌شود. در دو دههٔ اخیر روش‌های نیمه‌تجربی مختلفی برای تعیین میزان کرنش حجمی (نشست) و کرنش برشی حداکثر بر اساس داده‌های صحرایی و آزمایشگاهیی ارائه شده است. هدف اصلی در تحقیق حاضر، مقایسهٔ نتایج ارزیابی پتانسیل وقوع روان‌گرایی از دیدگاه شدت خطر وقوع و میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی برمبنای استفاده از نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)و سرعت موج برشی (Vs) در امتداد مسیر خط ۲ متروی شهر تبریز است. در این تحقیق، ابتدا تعداد ٥٤ حلقه گمانه در امتداد خط ۲ متروی ذکر شده جمع‌آوری و بررسی شده است. سپس، پتانسیل روان‌گرایی در محدودهٔ بررسی شده براساس روش‌های پیشنهاد شده انجام شده و شاخص خطر روان‌گرایی(LPI) درآن‌ها برآورد شده است. سپس میزان نشست احتمالی در لایه‌های خاکی ناشی از وقوع روان‌گرایی براساس نتایج حاصل از دو روش پیشنهادی انجام گرفته است. نتایج به‌دست آمده از تحقیق نشان می‌دهد که دو روش تطابق مناسبی نداشته و خطر وقوع روان‌گرایی حاصل از روش SPT در مقایسه با روش Vs دارای میزان کم‌تری است. هم‌چنین پیش‌بینی میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی برمبنای روش سرعت موج برشی در مقایسه با روش آزمون مقاومت نفوذ استاندارد مقدار بیش‌تری دارد.

واژه‌های کلیدی: روان‌گرایی، نشست، خط ۲ متروی تبریز، آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)، سرعت موج برشی (Vs).

*نویسنده مسئول rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

مقدمه

ماسه‌های سست هنگامی که در معرض تکان‌های لرزه‌ای قرار می‌گیرند، تمایل به تراکم و نشست دارند. تراکم لایه‌های زیرین خاک به‌صورت نشست در سطح زمین آشکار می‌شود که می‌تواند سبب خرابی سازه‌های قرار گرفته بر سطح زمین شود. در ماسه‌های خشک، نشست در طی تکان‌های لرزه‌ای تحت شرایط تنش مؤثر ثابت و خیلی سریع رخ می‌دهد؛ از این‌رو نشست نهشته ماسه‌ای خشک معمولاً پیش از انتهای زلزله کامل می‌شود. اما اگر ماسه اشباع بوده و زهکشی در آن محدود شده باشد، شرایط حجم ثابت برقرار است و اثر عمدهٔ تکان‌های لرزه‌ای تولید اضافه فشار منفذی است. در این حالت نشست هم‌زمان با استهلاک اضافه فشار منفذی اتفاق می‌افتد که می‌تواند پس از اتمام زلزله نیز ادامه یابد. بنابراین نشست نهشته ماسه‌ای اشباع به زمان بیش‌تری نیاز دارد که این زمان بسته به نفوذپذیری و تراکم پذیری خاک و هم‌چنین طول مسیر زهکشی می‌تواند از چند دقیقه تا چند روز تغییر کند. اگرچه تخمین نشست ماسه‌ها تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای مشکل است و خطای موجود در آن حتی از مقادیر متداول خطا در تخمین نشست ایستایی ۲۵ تا ۵۰ درصد نیز بیش‌تر است. هدف اصلی در تحقیق حاضر بررسی امکان ارزیابی میزان نشست احتمالی در لایه‌های خاکی در امتداد خط ۲ متروی تبریز است که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.

روانگرایی و نشست

اگر نهشته‌ای ماسه‌ای اشباع تحت ارتعاش قرار گیرد تمایل به تراکم و کاهش حجم پیدا می‌کند در این حالت اگر امکان زهکشی برقرار نباشد نتیجه کار افزایش فشار حفره‌ای است. اگر به‌علت ارتعاش پیوسته فشار حفره‌ای آب در نهشته‌های ماسه‌ای افزایش یابد گاهی مواقع مقدار آن ممکن است مساوی فشار سرباره شود. بر اساس مفهوم تنش مؤثر می‌توان نوشت:

$$\sigma' = \sigma - u \qquad (۱)$$

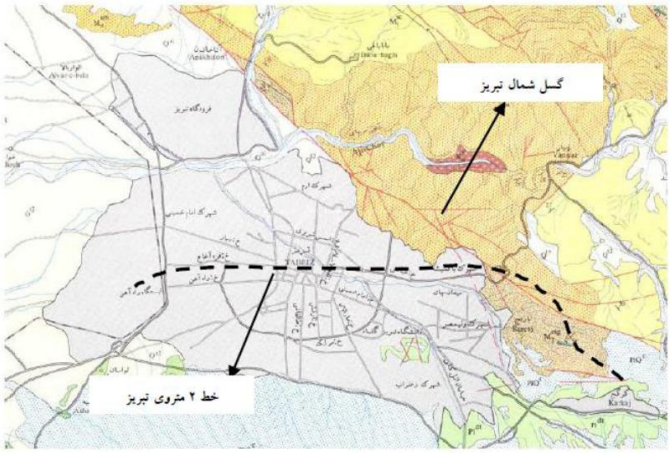
که در این رابطهٔ σ' تنش مؤثر، σ فشار سرباره و u فشار آب حفره‌ای است. اگر مساوی u شود در این صورت σ' مساوی صفر می‌شود. تحت این شرایط ماسه هیچ‌گونه مقاومت برشی

نخواهد داشت و به حالت مایع درمی‌آید. به چنین وضعی روان‌گرایی می‌گویند. روان‌گرایی ماسه‌های اشباع در حین زلزله عامل خسارات زیادی به ساختمان‌ها، سدهای خاکی و سازه‌های حائل بوده است. [۱]. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلف آزمایشگاهی و صحرایی برای ارزیابی مقاومت روان‌گرایی خاک‌ها ارائه شده است. از جمله روش‌های صحرایی می‌توان به استفاده از آزمون‌های مقاومت نفوذ استاندارد [۲]، [۳]، [٤]، مقاومت نفوذ مخروط [۵] و آزمایش‌های ژئوفیزیکی با اندازه‌گیری سرعت موج برشی [٦]، [۷] اشاره کرد. تمایل ماسه‌ها به متراکم شدن هنگامی که در معرض لرزش‌های زلزله قرار می‌گیرند به خوبی مطالعه و بررسی شده است. متراکم شدن لایه‌های زیر سطحی خاک، در سطح زمین به شکل نشست ظاهر می‌شود. معمولاً نشست یک تودهٔ ماسه خشک در پایان زلزله کامل می‌شود. اما نشست توده ماسه اشباع به زمان بیش‌تری نیاز دارد. این نشست تنها زمانی رخ می‌دهد که فشار منفذی ناشی از زلزله مستهلک شود. مدت زمان لازم برای وقوع این نشست به نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک و طول مسیر زهکشی شده بستگی دارد، این زمان ممکن است بین چند دقیقه تا چند روز در نوسان باشد. تعیین نشست حاصل از زلزله در ماسه مشکل است و خطاهای بین ۲۵٪ تا ۵۰٪ در پیش‌بینی نشست استاتیکی معمول است و حتی برای بارگذاری‌های پیچیده‌تر زلزله، این خطاها بیش‌تر نیز می‌شود [۸]. میزان نشست در لایه‌های ماسه‌ای بر اساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد در دو حالت لایه‌های خشک و اشباع [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤] و سرعت موج برشی [۱۵] صورت می‌گیرد. در ادامه، ابتدا شرایط عمومی و لایه‌بندی خاک در محدودهٔ بررسی شده در این تحقیق انتخاب و توصیف شده و سپس ضمن ارائه خلاصه‌ای از روش‌های مقاومت نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی، نحوهٔ برآورد میزان نشست احتمالی در لایه‌های خاکی پس از وقوع روان‌گرایی با استفاده از آزمون مقاومت نفوذ استاندارد در دو شرایط خشک و اشباع و با استفاده از روش سرعت موج برشی در دو حالت سیمنتاسیون و غیرسیمنتاسیون در محدودهٔ بررسی شده بیان می‌شود. در انتها نتایج به‌دست آمده از تحقیق را شرح می‌دهیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

شرایط عمومی و لایه‌بندی خاک

به‌منظور ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی لایه‌های خاکی و میزان نشست حاصل از آن، اطلاعات ژئوتکنیکی تعداد ٥٤ حلقه گمانه حفاری شده در امتداد خط ۲ متروی تبریز جمع‌آوری و استفاده شده است. طول مسیر حدود ١٤ کیلومتر است که موقعیت آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل اساسی در ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌ها محسوب می‌شود. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در مجموع عمق آب زیرزمینی بین ۲ تا بیش از ۳۰ متر است. برای ارزیابی سطح ایستابی در گمانه‌ها در محدودهٔ بررسی شده از نقشه‌های هم عمق آب زیرزمینی دشت تبریز و گزارش سطح آب زیرزمینی در موقعیت حفر گمانه‌ها استفاده شده است (شکل ۲).



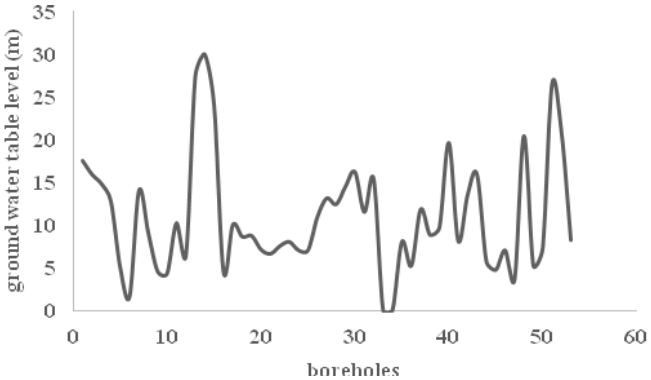
شکل ۱. نقشهٔ گسل‌های فعال ناحیهٔ شمال خط ۲ متروی تبریز **ت خط ۲ متروی تبریز**

تحلیل گمانه‌ها برای ارزیابی نشست در لایه‌های خاکی حاصل از وقوع روان‌گرایی

برای تحلیل گمانه‌ها و تعیین پتانسیل روان‌گرایی برای برآورد میزان نشست در لایه‌های خاکی باید برآوردی از شتاب حداکثر سطح زمین صورت گیرد. با توجه به این‌که گسل شمال تبریز یکی از مهم‌ترین و فعال‌ترین گسل‌های منطقه است که در فاصلهٔ کم‌تر از ۵۰۰ متری خط

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

۲ قطار شهری قرار دارد. بنابراین طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران–ویرایش چهارم میزان حداکثر شتاب سطحی برابر ۰/۳۵g (دوره بازگشت ٤٧٥ سال و عمر مفید ۵۰ ساله) و بزرگای زلزله برابر ۷/۵ در نظر گرفته شده است [١٦] (شکل ۱).



شکل ۲. نقشهٔ تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدودهٔ بررسی شده در شهر تبریز

۱. ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی بر اساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد

در ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌ها در محدودهٔ بررسی شده با استفاده از نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد از روش ساده شده که ادریس و بولانجر در سال ۲۰۱۰ [٤] ارائه کرده‌اند استفاده شده است. به‌طوری‌که، ابتدا مقدار نسبت تنش تناوبی (CSR-Cyclic Stress Ratio) که بیان‌کنندهٔ میزان شدت بارگذاری لرزه‌ای در بزرگای ۷/۵ است با استفاده از رابطهٔ (۲) برآورد شد:

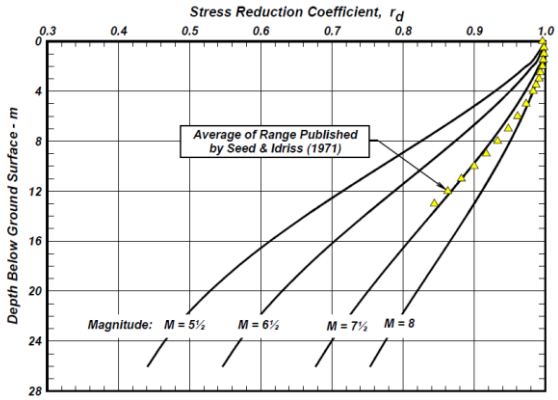
$$CSR_{7.5} = 0.65\frac{a_{max}}{g}.\frac{\sigma_V}{\sigma'_V}.r_d.\frac{1}{MSF} \qquad (۲)$$

در این رابطه، a_{max} حداکثر شتاب سطحی، g شتاب ثقل، σ_V تنش کل در عمق بررسی شده، σ'_V تنش مؤثر در عمق بررسی شده، r_d ضریب کاهش تنش با استفاده از شکل ۵ برآورده شده و MSF[1] فاکتور مقیاس بزرگای زلزله است که بر اساس تحقیقات آندروس و استوکی در سال ۱۹۹۷ [٦] با استفاده از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود در رابطهٔ (۳) Mw بزرگای زلزله است:

1. Magnitude Scale Factor

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-3.3} \quad (۳)$$



شکل ٤. نحوهٔ تعیین ضریب کاهش تنش [۱۷]

به‌منظور تعیین مقدار پارامتر نسبت مقاومت تناوبی خاک CRR[1] که بیان‌کنندهٔ مقاومت خاک در برابر وقوع روان‌گرایی است طبق روش ساده شده و اصلاح شده سید و ادریس در سال ۱۹۷۱ [۱] و ادریس و بولانجر در سال ۲۰۱۰ [٤]، از نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد استفاده می‌شود. بدین‌منظور ابتدا نتایج حاصل از آزمون مقاومت نفوذ استاندارد بر اساس رابطهٔ (٤) با کاربرد پارامترهای ارائه شدهٔ اسکمپتون در سال ۱۹۸٦ [۱۸] در جدول ۱ اصلاح می‌شود:

$$(N_1)_{60} = NSPT \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (٤)$$

در رابطهٔ (٤)، N_{SPT}، عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد، C_N، ضریب اصلاح برای فشار سربار، C_E، ضریب اصلاح انرژی چکش، C_S، ضریب اصلاح قاشق نمونه‌گیر، C_B، ضریب اصلاح قطر گمانه، C_R، ضریب اصلاح طول میلهٔ نمونه‌گیر و $(N_1)^{60}$ عدد اصلاح شده آزمون مقاومت نفوذ استاندارد است. سپس، براساس پیشنهاد ارائه شدهٔ ادریس و بولانجر(۲۰۱۰) [٤]، ضریب اصلاح تنش سربار (C_N) با کاربرد رابطهٔ (۵) تعیین شود:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma_V'}\right)^m \leq 1.7, P_a = 100kPa \quad (۵)$$
$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60}}$$

1. Cyclic Resistance Ratio

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

که در این رابطه، Pa=100kPa، فشار اتمسفر است و σ_v'تنش مؤثر در عمق بررسی شده و $(N_1)_{60}$ عدد اصلاح شده آزمون مقاومت نفوذ استاندارد است. پس از اصلاح عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد، مقدار معادل آن برای ماسه تمیز $(N_1)_{60CS}$ تعیین شده و با استفاده از آن مقدار نسبت مقاومت تناوبی با کاربرد رابطه‌های زیر برآورد می‌شود: در رابطهٔ (٦)، FC درصد خاک ریزدانه در عمق بررسی شده در لایهٔ خاکی است.

$$\left(N_1\right)_{60CS} = \left(N_1\right)_{60} + \Delta\left(N_1\right)_{60} \qquad (٦)$$

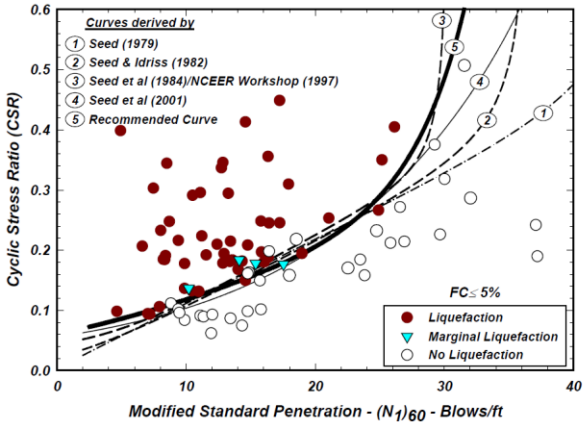
$$\Delta\left(N_1\right)_{60} = 1.63 + \exp\left(1 + \frac{9.7}{FC+0.1}\right) - \left(\frac{15.7}{FC+0.1}\right)^2$$

$$CRR = \exp\left(\frac{\left(N_1\right)_{60cs}}{14.1}\right) + \left(\frac{\left(N_1\right)_{60CS}}{126}\right)^2 - \left(\frac{\left(N_1\right)_{60CS}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{\left(N_1\right)_{60CS}}{25.4}\right)^4 - 2.8)$$

جدول ۱. ضرایب اصلاحی عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد [۱۸]

ضریب‌ها	مشخصات تجهیزات	عبارت	ضریب تصحیح
نسبت انرژی	چکش دونات چکش Safety چکش دونات از نوع اتوماتیک	C_E	۰/۵–۱ ۱/۲–۱/۷ ۰/۸–۱/۳
قطرگمانه	٦٥تا١١٥ ١٥٠–١١٥ ٢٠٠–١٥٠	C_B	۱ ۱/۰۵ ۱/۱۵
طول میله	٣–٤متر ٤–٦متر ٦–١٠متر ١٠–٣٠متر بیش از ٣٠متر	C_R	۰/۷۵ ۰/۸۵ ۰/۹۵ ۲۱ <۱
روش نمونه‌گیری	نمونه‌گیری استاندارد نمونه‌گیری بدون پوشش	C_S	۱ ۱/۱–۱/۳

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



شکل۵. نمودار تعیین نسبت مقاومت تناوبی براساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد اصلاح شده [٤]

۲. ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی بر اساس سرعت موج برشی

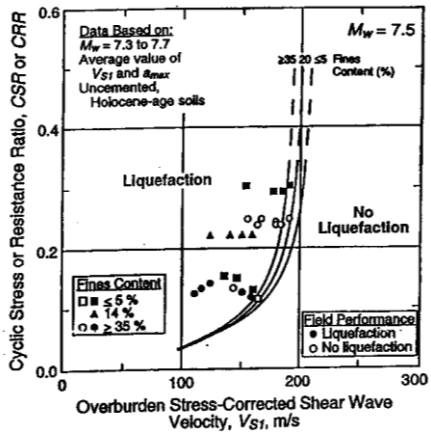
ارزیابی خاک‌های مستعد روان‌گرایی (ماسه و لای) با استفاده از مقدار سرعت موج برشی (Vs) روش جدیدی است. از این رو پژوهش‌های انجام شده در این زمینه محدود است. در ایران می‌توان به تحقیقات انجام‌شدهٔ شفیعی و همکاران (۱۳۸۷)[۱۹] و دبیری و همکاران (۲۰۱۱) [۲۰] اشاره کرد. در این روش به‌جای عدد SPT از میزان سرعت موج برشی برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، از روش و نتایج بررسی‌های انجام شدهٔ اندروس و استوکی و جانگ (۲۰۰٤) [۲۱] استفاده شده است. مقدار سرعت موج برشی به‌وسیله آزمایش‌های صحرایی ژئوسایزمیک انکساری، درون چاهی و آنالیز طیفی امواج سطحی به‌دست می‌آید. مطابق روش مذکور، مقدار سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در عمق‌های بررسی شده باید با استفاده از رابطهٔ (۷) نسبت به تنش مؤثر قائم در همان عمق اصلاح می‌شود:

$$V_{S1} = V_S\left(\frac{P_a}{\sigma_V'}\right)^{0.25}.\left(\frac{0.5}{K_0'}\right)^{0.125} \qquad (۷)$$

که در رابطهٔ مذکور، V_S سرعت موج برشی در عمق لایهٔ خاکی بررسی شده، V_{S1} سرعت موج برشی اصلاح شده، Pa، فشار اتمسفر (برابر ۱۰۰ کیلوپاسکال) σ_V' تنش مؤثر در عمق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

بررسی شده و K_0 ضریب فشار خاک در حال سکون است که در این پژوهش برابر ۰/۳ فرض شده است. میزان مقاومت برشی تناوبی(CRR) تودهٔ خاک با استفاده از رابطهٔ (۸) و نمودارهای شکل ٦ محاسبه می‌شود.



شکل٦. ارتباط بین سرعت موج برشی اصلاحی(V_{s1})ونسبت مقاومت تناوبی(CRR) برای خاک‌های بدون سمنتاسیون در درصدهای مختلف ریزدانه و برای بزرگای زلزله ۷/۵ (اندروس و استوکی و جانگ(۲۰۰٤) [۲۱]

$$CRR = K_{a2}\{0.022(\frac{K_{a1}V_{s1}}{100})^2 + 2.8(\frac{1}{V_{s1}^* - K_{a1}V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*})\}MSF \qquad (۸)$$

در این رابطه، V_{s1}^* حداکثر سرعت موج برشی برای وقوع روان‌گرایی است که براساس تغییرات میزان درصد ریزدانه بدین‌صورت تعیین می‌شود:

$$V_{s1}^* = 215 \qquad FC \le 5\% \qquad (a \qquad (۹)$$

$$V_{s1}^* = 215 - 0.5(FC - 5) \qquad 5 \prec FC \prec 35\% \qquad (b$$

$$V_{s1}^* = 200 \qquad FC \ge 35\% \qquad (c$$

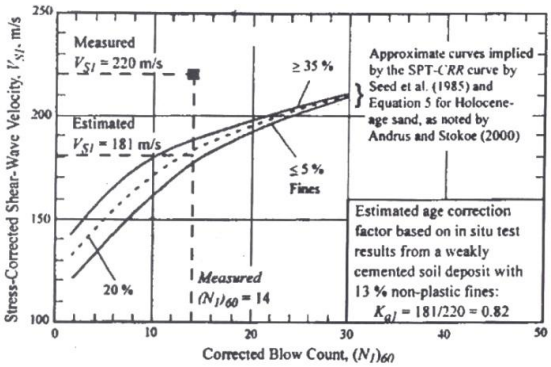
MSF، فاکتور مقیاس بزرگا زلزله است که با استفاده از رابطهٔ (۹) محاسبه می‌شود:

$$MSF = (\frac{M_w}{7.5})^{-2.56} \qquad (۱۰)$$

در این پژوهش به‌دلیل آن‌که میزان Mw=۷/۵ فرض شده است بنابراین فاکتور مقیاس بزرگا برابر یک می‌شود. پارامترهای K_{a1} و K_{a2} به‌ترتیب ضریب‌های تأثیر سیمنتاسیون خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

بر سرعت موج برشی(V_s) و نسبت مقاومت تناوبی هستند که به‌ترتیب مطابق شکل ۷ و جدول ۲ تعیین می‌شوند.



شکل۷. نمودار پیشنهادی برای برآورد ضریب سمنتاسیون خاک (K_{a1})با استفاده از سرعت موج برشی اصلاحی(V_{s1}) و عدد نفوذ استاندارد$SPT-(N_1)_{60}$ (اندروس و استوکی و جانگ-۲۰۰٤) [۲۱]

مطابق شکل ۸ نحوهٔ برآورد ضریبK_{a1} با توجه به نتایج آزمایشSPT برای خاک‌های با سیمنتاسیون ضعیف که دارای ۵ درصد و ۱۰ درصد و ۳۵ درصد ریزدانه باشند ارائه شده است. چنان که در این شکل ملاحظه می‌شود، مقدار K_{a1} از حاصل تقسیم مقدار سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده از نمودار به مقدار سرعت اندازه‌گیری شده در محل به‌دست می‌آید.

جدول ۲. تعیین پارامتر(K_{a2}) با استفاده از سن زمین‌شناسی (اندروس و استوکی و جانگ-۲۰۰٤) [۲۱]

زمان(سال)	K_{a2}
≺۱۰۰۰۰	۱
۱۰۰۰۰	۱/۱
۱۰۰۰۰۰	۱/۳
۱۰۰۰۰۰۰	۱/۵

در مناطقی که خاک آن‌ها دارای سیمنتاسیون و سن بیش‌تر از ۱۰۰۰۰ سال باشد، سیمنتاسیون باعث افزایش مقدار سرعت موج برشی (V_s) اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های لرزه‌ای می‌شود و بنابراین سرعت موج برشی با استفاده از ضریب K_{a1} اصلاح می‌شود. ضریب K_{a1} بین ۰/٦ تا ۰/۸ متغیر است بدیهی است اگر خاک ارزیابی شده، بدون سیمنتاسیون و سن آن کم‌تر از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

۱۰۰۰۰ سال باشد، مقدار ضریب K_{a2} برابر یک می‌شود. درحالتی‌که وضعیت خاک نامشخص باشد و یا اطلاعات مقاومت نفوذ استاندارد در خاک قابل دسترسی نباشد، مقدار K_{a2} برابر۰/٦ فرض می‌شود. در این پژوهش با توجه به این‌که نمودارهای شکل ۸ با داده‌های بررسی شده تطابق نداشته است بنابراین پارامتر K_{a1} برای فرض شرایط سیمنتاسیون برای خاک برابر ۰/۷ در نظر گرفته شده است.

۳. اصلاح نسبت مقاومت تناوبی تودهٔ خاک

شایان ذکر است که در ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی انجام شده براساس دو روش استفاده شده در این مقاله، مقدار برشی تناوبی تودهٔ خاک (CRR) در عمق بررسی شده، به‌شرط آن‌که مقدار تنش مؤثر قائم از ۱۰۰ کیلوپاسکال تجاوز کند با استفاده از رابطهٔ (۱۱) اصلاح شده است (هاینس و اولسن-۱۹۹۸) [۲۲]:

$$CRR_j = K_\sigma . CRR \qquad (۱۱)$$

در رابطهٔ (۱۱)، CRR_J نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک اصلاح شده، CRR نسبت مقاومت برشی تناوبی تودهٔ خاک در عمق بررسی شده و K_σ ضریبی است که تابع سستی و متراکم بودن خاک است که با استفاده از رابطهٔ (۱۲) مقدار آن را به‌دست آورد:

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{100}\right)^{f-1} \qquad (۱۲)$$

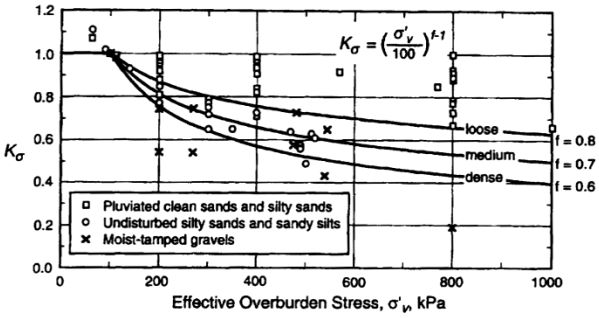
در این رابطه، مقدار f بسته به‌میزان تراکم خاک بدین‌صورت درنظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که، برای خاک‌های شل f=۰/۸، برای خاک‌های با تراکم متوسط f =۰/۷ و برای خاک‌های با تراکم زیاد f =۰/٦ است. هم‌چنین، از نمودار ارائه شده در شکل ۸ نیز می‌توان برای تعیین K_σ استفاده کرد.

٤. ضریب اطمینان

مقدار ضریب اطمینان در مقابل روان‌گرایی برای هر دو روش بررسی شده با استفاده از رابطهٔ (۱۲) محاسبه می‌شود ضریب اطمینان کم‌تر از یک نشان‌دهندهٔ احتمال وقوع روان‌گرایی در عمق بررسی شده است.

$$F_S = \left(\frac{CRR_J}{CSR}\right) \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



شکل ۹. نمودار تعیین K_σ برحسب تنش مؤثرقائم [۲۲]

۵. شاخص پتانسیل روان‌گرایی (LPI)

برای برآورد شدت روان‌گرایی احتمالی در محدودهٔ بررسی شده در هر دو روش مورد پژوهش از رابطهٔ (۱٤) ارائه شده به‌وسیلهٔ ایواساکی و همکاران (۱۹۷۸ و ۱۹۸۲) [۲۳]، [۲٤] استفاده شده است:

$$LPI = \int_0^{20} F(Z).W(Z).dZ \quad (۱٤)$$

$$\text{for } Fs \leq 1 F(Z)= 1-F_S \text{ ; and for } Fs > 1 \ F(Z)=0 \quad (۱۵)$$

$$W(Z)=10-0.5Z \quad (۱٦)$$

در روابط مذکور، LPI شاخص پتانسیل روان‌گرایی، Fs ضریب اطمینان در مقابل روان‌گرایی در عمق بررسی شده، Z عمق بررسی شده است. مقدار LPI بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است و جدول ۳ پتانسیل روان‌گرایی را بر اساس شاخص پتانسیل روان‌گرایی به چهار قسمت طبقه‌بندی می‌کند.

جدول ۳. تعیین میزان خطر روان‌گرایی (ایواساکی و همکاران-۱۹۸۲) [۲۳]، [۲٤]

LPI=۰	خطرپذیری روان‌گرایی خیلی اندک است. تحقیقات، پژوهش‌ها و اندازگیری‌های جزئی نیاز نیست
۰< LPI<۵	خطرپذیری روان‌گرایی اندک است. تحقیقات بیش‌تری مورد نیاز است. اندازگیری‌های روان‌گرایی مورد نیاز است.
۵ <LPI<۱۵	خطرپذیری روان‌گرایی زیاداست. تحقیقات بیش‌تری مورد نیاز است. اندازه‌گیری‌های روان‌گرایی مورد نیاز است.
LPI >۱۵	خطرپذیری روان‌گرایی خیلی زیاد است. تحقیقات و اندازه‌گیری‌های زیادی مورد نیاز است.

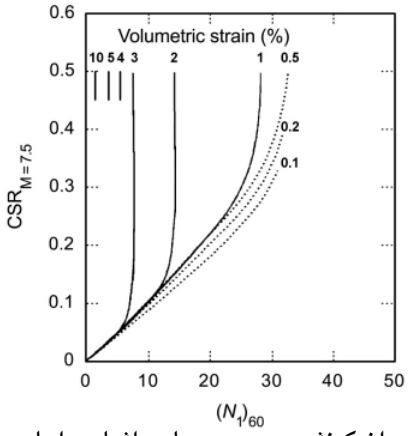
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

٦. ارزیابی میزان نشست در لایه‌های خاکی به‌علت روان‌گرایی

در تحقیق حاضر، محاسبهٔ وقوع میزان نشست یا در واقع کرنش حجمی در خاک‌ها پس از وقوع روان‌گرایی با استفاده از نتایج حاصل از دو روش برمبنای نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی در لایه‌های خاکی پایین سطح ایستابی (یعنی در حالت اشباع) بررسی شده است که در ادامه به شرح آن می‌پردازیم.

٦-١. ارزیابی میزان نشست با استفاده از روش مقاومت نفوذ استاندارد

به‌منظور تعیین میزان نشست خاک‌ها در پایین سطح آب زیرزمینی در لوگ گمانه‌های محدودهٔ بررسی شده از روش توکیماتسو و سید [۱۰] استفاده شده است (شکل ۱۰). در تحقیق حاضر، به میزان کرنش حجمی (ε_V) و نشست در لایه‌های زیرین سطح آب زیرزمینی در لوگ گمانه‌ها (تعداد ٥٤ حلقه گمانه) در محدوده خط ۲ متروی تبریز از آن استفاده شده است.



شکل ۱۰. نمودار تعیین میزان کرنش حجمی در ماسه اشباع براساس نسبت تنش تناوبی و عدد مقاومت نفوذ استاندارد [۱۰]

٦-٢. ارزیابی نشست پس از روانگرایی با استفاده از سرعت موج برشی

به‌منظور ارزیابی میزان نشست پس از روان‌گرایی در لایه‌های خاکی اشباع براساس میزان سرعت موج برشی از روش و تحقیقات انجام شده به‌وسیلهٔ ایشیهارا و یوشیمینه (۱۹۹۲) [۱۳]، یوشیمینه و همکاران (۲۰۰٦) [١٤] و یی (۲۰۰۹) [۱۵] استفاده شده است. روند تحلیل و ارزیابی بدین‌شرح بندها قابل ارائه است:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

۱. در این روش، ابتدا میزان سرعت موج برشی اصلاح شده در لایه‌های خاکی با استفاده از رابطهٔ (٦) برآورد می‌شود. سپس میزان سرعت موج برشی اصلاح شده معادل ماسه تمیز $(V_{s1})_{cs}$ با استفاده از رابطهٔ (۲۰) ارزیابی می‌شود:

$$(V_{s1})_{cs} = K_{CS} \cdot (V_{s1}) = K_{CS} \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma_V'}\right)^{0.25} \qquad (۲۰)$$

که در این رابطه، K_{CS} با توجه به رابطهٔ (۲۱) و با توجه به درصد ریزدانه تعیین می‌شود. در روابط (۲۱) FC برحسب درصد قرار داده می‌شود:

$$K_{CS} = 1 \quad \text{for} \quad FC \leq 5\% \qquad (a \qquad (۲۱)$$

$$K_{CS} = 1 + T\,(FC-5) \quad \text{for } 5\% < FC < 35\% \qquad (b$$

$$K_{CS} = 1 + 30\,T \quad \text{for } FC \geq 35\% \qquad (c$$

$$T = 0.009 - 0.109\left(\frac{V_{S1}}{100}\right) + 0.038\left(\frac{V_{S1}}{100}\right)^2 \qquad (d$$

۲. در ادامه میزان تراکم نسبی خاک با استفاده مقدار سرعت موج برشی اصلاح شده معادل ماسه تمیز با استفاده از رابطهٔ (۲۲) براورد می‌شود:

$$D_R = 17.94\left[\frac{(V_{S1})_{CS}}{100}\right]^{1.976} \ (\%) \qquad (۲۲)$$

۳. میزان کرنش برشی حداکثر برای وقوع روان‌گرایی و میزان نشست (γ_{max}) با توجه به مقادیر ضریب اطمینان در مقابل روان‌گرایی و سرعت موج برشی اصلاح شده ماسه تمیز براساس راابطهٔ (۲۳) تعیین می‌شود:

$$\gamma_{max} = 0 \ \text{ for } \ FS > 2 \qquad (a \qquad (۲۳)$$

$$\gamma_{max} = 0.035(2 - FS)\left(\frac{1 - F_\alpha}{FS - F_\alpha}\right) \ \text{ for } \ F_\alpha \leq FS < 2 \qquad (b$$

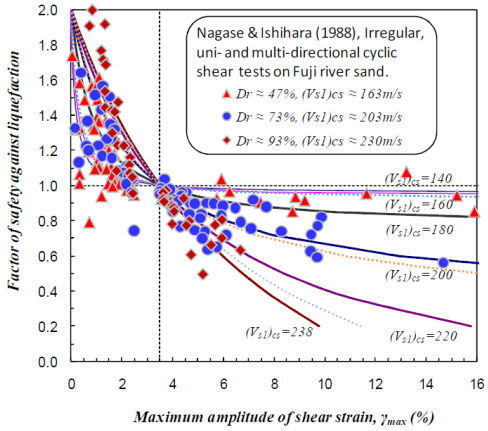
$$\gamma_{max} = \infty \ \ FS < F_\alpha \qquad (c$$

$$F_\alpha = 0.032 + 0.836\left(\frac{(V_{S1})_{CS}}{100}\right)^{1.976} - 0.19\left(\frac{(V_{S1})_{CS}}{100}\right)^{3.952} \qquad (d$$

$$\text{for } (V_{S1})_{CS} \geq 140 \text{ m/s}$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

لازم بذکر است که در رابطهٔ (۲۳) یک ضریب اطمینان حدی موجود است. (F_α) در شرایطی که میزان سرعت موج برشی اصلاح شده ماسه تمیز بیش از ۱٤۰ متر برثانیه باشد محاسبه می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار اتباط بین حداکثر کرنش برشی(γ_{max}) و ضریب اطمینان در مقابل روان‌گرایی با توجه به سرعت موج برشی (یی-۲۰۰۹)[۱۵]

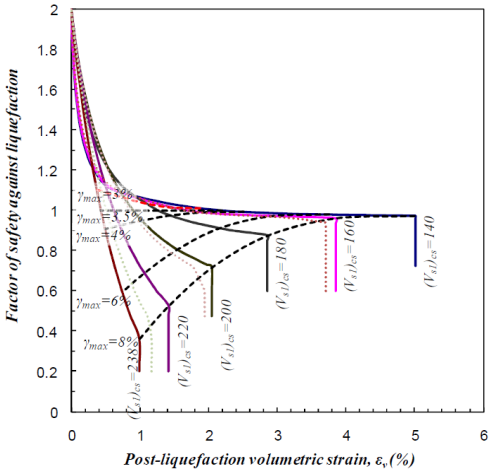
٤. با توجه به تحقیقات ایشیهارا و یوشیمینه در سال ۱۹۹۲، مشاهده شده است که میزان کرنش حجمی در ماسه تمیز پس از وقوع روان‌گرایی تابعی از کرنش برشی حداکثر است. براین اساس یی در سال ۲۰۰۹ و بر اساس پژوهش‌های یوشیمینه (۲۰۰٦) رابطهٔ تجربی (۲٤) و (۲۵) را برای برآورد میزان کرنش حجمی با استفاده از سرعت موج برشی ارائه کرده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳):

$$\varepsilon_V = 1.5 \times \exp(-0.449(\frac{(V_{S1})_{CS}}{100})^{1.976} \times \min(0.08, \gamma_{\max})(\%) \qquad (۲٤)$$

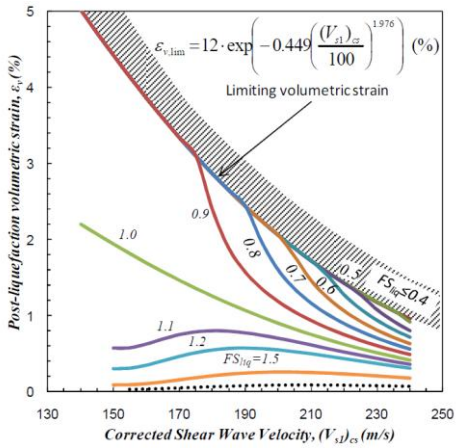
$$\varepsilon_{V\lim} = 12 \times \exp\left[-0.449(\frac{(V_{S1})_{CS}}{100})^{1.976}\right](\%) \quad \text{for FS} \le 0.4 \qquad (۲۵)$$

۵. در انتها، پس از محاسبه میزان کرنش حجمی (ε_V) در هر لایهٔ خاکی از لوگ گمانه‌ها میزان نشست هر لایه بر حسب متر تعیین شده است و برای هر گمانه، مجموع میزان نشست برای لایه‌های زیرسطح آب زیرزمینی محاسبه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



شکل ۱۲. نمودار اتباط بین ضریب اطمینان در مقابل روان‌گرایی با کرنش حجمی در لایه خاکی پس از روان‌گرایی با توجه به سرعت موج برشی (یی-۲۰۰۹)[۱۵]



شکل ۱۳. نمودار اتباط بین کرنش حجمی در لایه خاکی پس از روان‌گرایی با سرعت موج برشی اصلاح شده معادل ماسه تمیز (یی-۲۰۰۹)[۱۵]

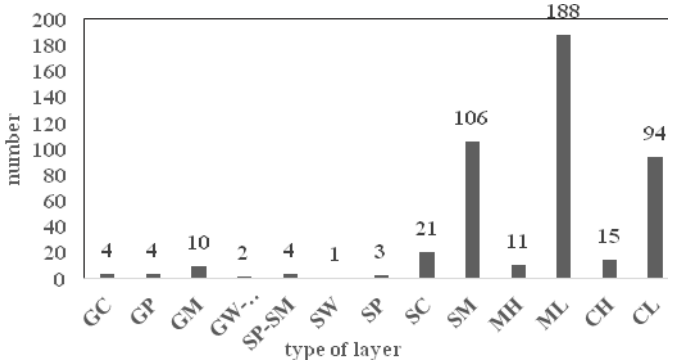
نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان در دو بخش بدین‌صورت می‌توان اشاره کرد:

الف) نتایج حاصل از ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی در امتداد خط ۲ متروی تبریز را می‌توان بدین‌صورت زیر بیان کرد:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

۱. در ٥٤ حلقه لوگ گمانه بررسی شده در امتداد مسیر خط ۲ متروی تبریز تا عمق ۲۰ که عمق هر لایه نیز متفاوت است و تعدادکل لایه‌ها ٤٦٤ عدد بوده است، لایه‌ها بر اساس جنس خاک بدین‌شرح است:



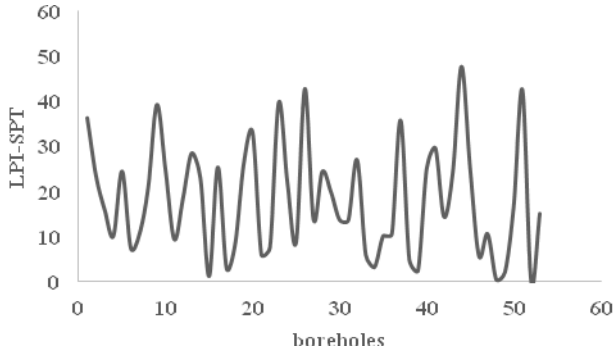
شکل ١٤. میزان فراوانی نوع لایه‌های خاکی در محدودهٔ بررسی شده

۲. میزان خطر پتانسیل روان‌گرایی در لایه‌های خاکی (LPI) طبق معیار ایواساکی و همکاران بر اساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد نشان می‌دهد که تقریباً ٦٥ درصد لایه‌ها در محدودهٔ خطر روان‌گرایی کم تا زیاد قرار گرفته‌اند. هم‌چنین تقریباً ۲ درصد لایه‌ها در محدودهٔ خطر روان‌گرایی زیاد قابل مشاهده‌اند. خلاصه این نتیجه در جدول ٥ قابل مشاهده است و هم‌چنین میزان تغییرات شاخص خطر پتانسیل روان‌گرایی در تمامی گمانه‌های بررسی شده مطابق شکل ۱٥ قابل مشاهد است.

جدول ٥. تعداد و درصد شاخص پتانسیل روان‌گرایی براساس آزمایش SPT

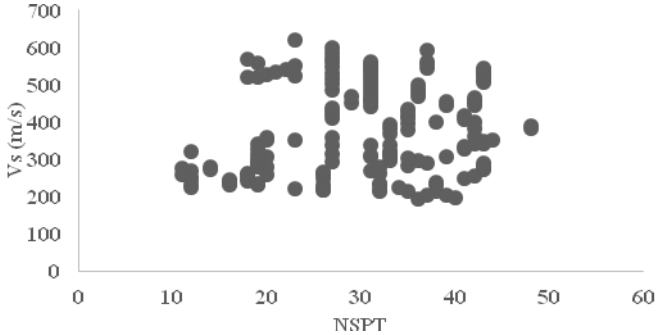
شاخص خطر پتانسیل روانگرایی	LPI =۰	0 < LPI≤ 5	5 < LPI≤15	LPI>15
تعداد لایه	۱٥٥	۲٥۸	٤۳	۸
درصد	۳۳/٤۱	٥٥/٦	۹/۲۷	۱/۷۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



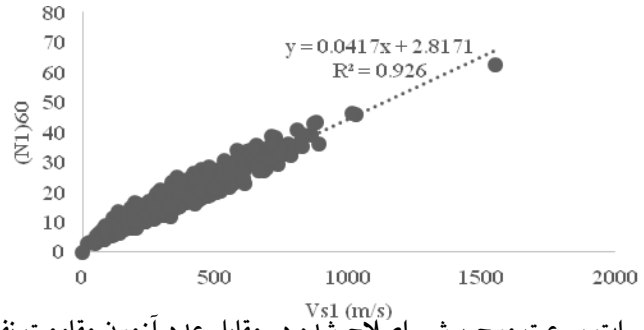
شکل ۱۵. تغییرات شاخص خطر روان‌گرایی در لوگ گمانه‌های ارزیابی شده در محدودهٔ بررسی شده برمبنای نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد

۳. در تحقیق حاضر، از مجموع ٥٤ حلقه گمانه ارزیابی شده در ۱۰ حلقه گمانه هم‌زمان با آزمون مقاومت نفوذ استاندارد آزمایش درون چاهی انجام شده بود. تغییرات سرعت موج برشی در مقابل عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد مطابق شکل ١٦ قابل مشاهده است. سپس با اعمال ضرائب اصلاحی مقادیر سرعت موج برشی اصلاح شده و عدد آزمون مقاومت نفوذ اصلاح شده تعیین شد که ارتباط بین آن دو مطابق شکل ۱۷ قابل ارائه شده است. با توجه به رابطهٔ تعیین شده مقادیر سرعت موج برشی اصلاح شده در بقیه گمانه‌ها تعیین شد.



شکل ١٦. تغییرات سرعت موج برشی در مقابل عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد در ۱۰ حلقه گمانهٔ بررسی شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



شکل ۱۷. تغییرات سرعت موج برشی اصلاح شده در مقابل عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد اصلاح شده در ۱۰ حلقه گمانهٔ بررسی شده

٤. میزان خطر پتانسیل روان‌گرایی در لایه‌های خاکی (LPI) طبق معیار ایواساکی و همکاران بر اساس روش سرعت موج برشی با فرض حالت سیمنتاسیون و غیرسیمنتاسیون به‌ترتیب نشان می‌دهند که تقریباً ٦٧ و ٥١ درصد لایه‌ها در محدودهٔ خطر روان‌گرایی کم تا زیاد قرار گرفته‌اند. هم‌چنین تقریباً ١٠ و ٦ درصد لایه‌ها به‌ترتیب در حالت سیمنته و غیرسیمنته در محدودهٔ خطر روان‌گرایی زیاد قابل مشاهده‌اند. خلاصه این نتایج در لایه‌ها مطابق جدول‌های ٦ و ٧ قابل مشاهده است. هم‌چنین تغییرات شاخص خطر روان‌گرایی در لو گمانه‌ها در حالت‌های سیمنتاسیون و غیرسیمنتاسیون لایه‌های خاکی مطابق شکل ٢٠ و ٢١ قابل مشاهده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود میزان خطر روان‌گرایی با فرض سیمنته بودن خاک‌ها دارای میزان بیش‌تری است.

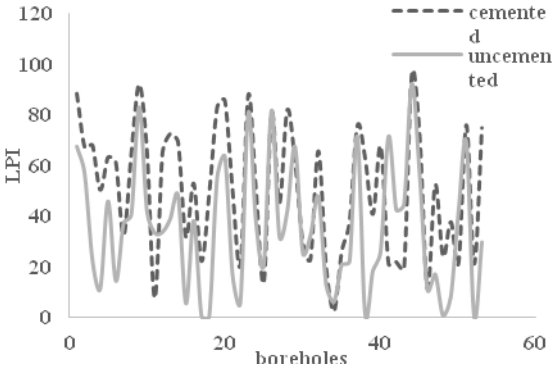
جدول ٦. تعداد و درصد شاخص پتانسیل روان‌گرایی براساس آزمایش Vs در حالت سیمنته

شاخص خطر پتانسیل روان‌گرایی	LPI =0	0 < LPI≤ 5	5 < LPI≤15	LPI>15
تعداد لایه	١٠٨	٢٠١	١٠٨	٤٧
درصد	٢٣/٨	٤٣/٢٢	٢٣/٢٨	١٠/١٢

جدول ٧. تعداد و درصد شاخص پتانسیل روان‌گرایی براساس آزمایش Vs در حالت غیرسیمنته

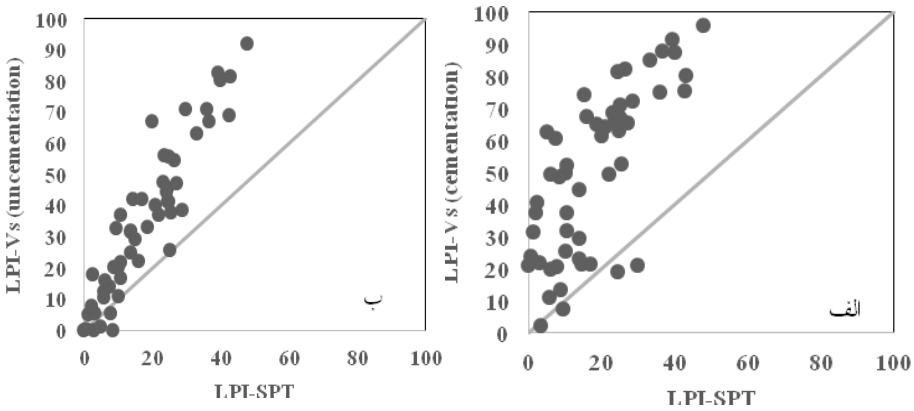
شاخص خطر پتانسیل روان‌گرایی	LPI =0	0 < LPI≤ 5	5 < LPI ≤15	LPI>15
تعداد لایه	١٩٧	١٤٧	٩٠	٣٠
درصد	٤٢/٤٦	٣١/٦٨	١٩/٤	٦/٤٦

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

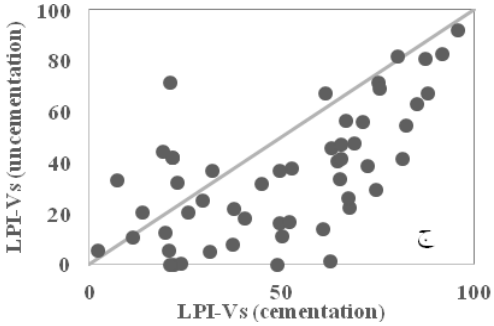


شکل ۲۰. تغییرات شاخص خطر روان‌گرایی در لوگ گمانه‌های ارزیابی شده در محدودهٔ بررسی شده برمبنای نتایج آزمون اندازه سرعت موج برشی (با فرض حالت سیمنتاسیون و غیرسیمنتاسیون در لایه‌های خاکی)

۵. مطابق شکل ۲۱ مقادیر شاخص خطر روان‌گرایی حاصل از ارزیابی لایه‌های خاکی اشباع براساس روش‌های آزمون مقاومت نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی (با فرض حالت‌های سیمنتاسیون و غیرسیمنتاسیون) مقایسه شده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده در می‌یابیم که میزان خطر روان‌گرایی براساس روش اندازه سرعت موج برشی (با فرض سیمنته بودن خاک‌ها) در مقایسه با روش آزمون مقاومت نفوذ استاندارد مقدار بیش‌تری دارد. هم‌چنین با فرض سیمنته بودن لایه‌های خاکی خطر وقوع روان‌گرایی در مقایسه با فرض غیرسیمنته بودن لایه‌های خاکی در روش اندازه سرعت موج برشی میزان بیش‌تری دارد.



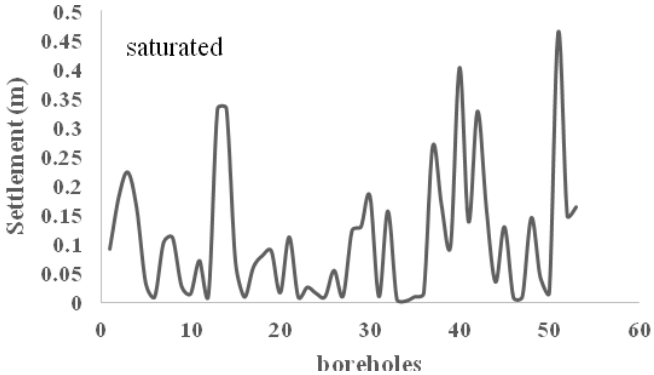
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



شکل ۲۱. مقایسهٔ تغییرات شاخص خطر روان‌گرایی در لوگ گمانه‌های ارزیابی شده در محدودهٔ بررسی شده: الف) برمبنای نتایج آزمون‌های مقاومت نفوذ استاندارد و اندازهٔ سرعت موج برشی(با فرض سیمنتاسیون)، ب) برمبنای نتایج **آزمون‌های مقاومت نفوذ استاندارد و اندازه سرعت موج برشی (با فرض غیرسیمنتاسیون)، ج) برمبنای نتایج آزمون اندازه سرعت موج برشی (با فرض حالت‌های سیمنتاسیون و غیرسیمنتاسیون)**

ب) نتایج حاصل از ارزیابی نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی در امتداد خط ۲ متروی تبریز را می‌توان بدین‌صورت بیان کرد:

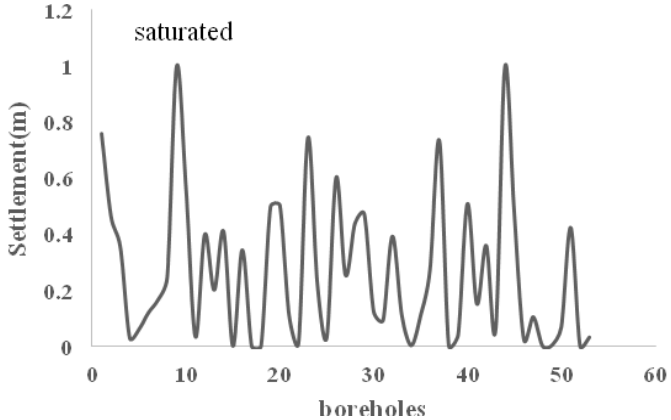
۱. مقادیر نشست احتمالی پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی زیرسفره آب زیرزمینی براساس روش توکیماتسو و سید (۱۹۸۷) در محدودهٔ بررسی شده و لوگ گمانه‌ها مطابق شکل ۲۲ قابل مشاهده است. بر این اساس می‌توان دریافت که حداکثر میزان وقوع نشست احتمالی برابر ۰/۴۵ متر است.



شکل ۲۲. تغییرات میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی اشباع در محدودهٔ بررسی شده برمبنای نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد

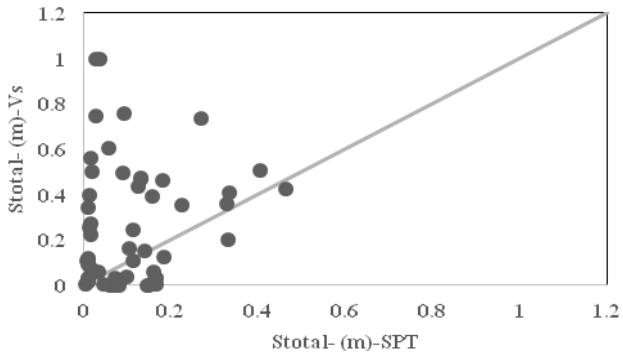
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

۲. مقادیر نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی زیرسفره آب زیرزمینی با استفاده از سرعت موج برشی در لوگ گمانه‌ها و در محدودهٔ بررسی شده براساس روش یی (۲۰۰۹) در شکل ۲۳ مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که احتمال وقوع نشست در محدودهٔ بررسی شده تا یک متر نیز می‌رسد.



شکل ۲۳. تغییرات میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی اشباع در محدودهٔ بررسی شده برمبنای نتایج آزمون اندازه سرعت موج برشی

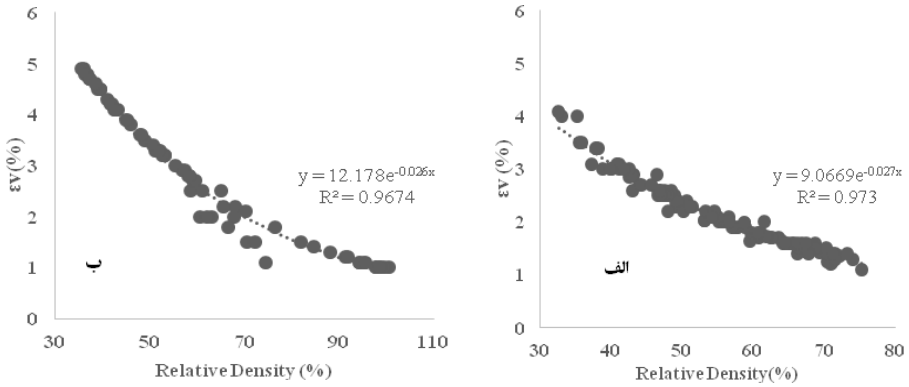
۳. مطابق شکل ۲٤ مقایسه‌ای بین مقادیر نشست احتمالی در لایه‌های خاکی اشباع برمبنای دو روش مذکور انجام شده است. براین اساس می‌توان دریافت که روش سرعت موج برشی میزان نشست بیش‌تری را در مقایسهٔ روش آزمون مقاومت نفوذ استاندارد پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۲٤. مقایسهٔ تغییرات میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی اشباع در محدودهٔ بررسی شده برمبنای نتایج آزمون‌های مقاومت نفوذ استاندارد و اندازه سرعت موج برشی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

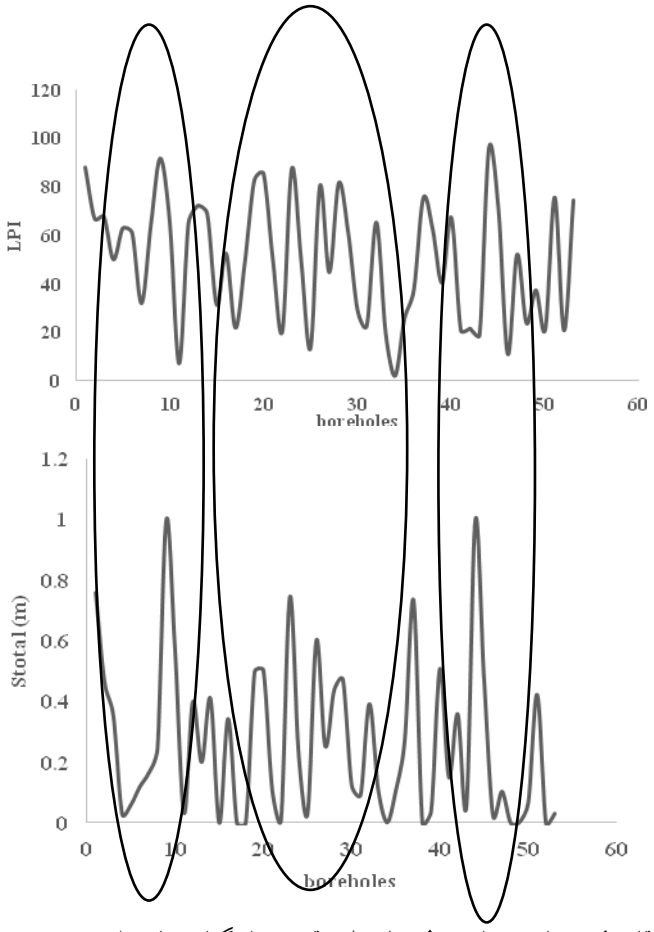
٤. نظور بررسی تأثیر میزان تراکم نسبی بر مقدار کرنش حجمی لایه‌های خاکی در پایین سفرهٔ آب زیرزمینی بر اساس نتایج آزمون نفوذ استاندارد روش اندازه سرعت موج برشی مطابق شکل ۲۵ الف و ب مقایسه‌ای انجام شده است. برمبنای نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که در هردو روش میزان کرنش حجمی با افزایش میزان تراکم نسبی کاهش می‌یابد. هم‌چنین کرنش حجمی براورد شده به‌وسیلهٔ سرعت موج برشی دارای میزان بیش‌تری در مقایسه با نتایج حاصل از آزمون مقاومت نفوذ استاندارد دارد.



شکل ۲۵. مقایسهٔ تغییرات میزان کرنش حجمی پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی در محدودهٔ بررسی شده الف) روش آزمون مقاومت نفوذ استاندارد، ب) روش اندازهٔ سرعت موج برشی

۵. مطباق شکل ۲٦ به‌منظور بررسی میزان هم‌بستگی و تطابق بین مقادیر شاخص خطر روان‌گرایی (با فرض حالت سیمنتاسیون) و نشست در لایه‌های خاکی اشباع پس روان‌گرایی حاصل از روش سرعت موج برشی مقایسه‌ای صورت گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که بین دو فاکتور بررسی شده هماهنگی و تطابق مناسبی وجود دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]



شکل ۲۶. مقایسهٔ تغییرات میزان خطر پتانسیل وقوع روان‌گرایی با میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی در محدودهٔ بررسی شده براساس روش اندازه سرعت موج برشی

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

چنان‌که در بخش‌های قبل اشاره شد، هدف اصلی در تحقیق حاضر، مقایسهٔ نتایج ارزیابی پتانسیل وقوع روان‌گرایی از دیدگاه شدت خطر وقوع و میزان نشست پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی برمبنای استفاده از نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (SPT) و سرعت موج برشی (Vs) در امتداد مسیر خط ۲ متروی شهر تبریز است. به‌طوری‌که ابتدا بر اساس

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (SPT) با کاربرد روش ارائه شدهٔ ادریس و بولانجر (۲۰۱۰) [٤] و سپس بر اساس روش سرعت موج برشی (Vs) با استفاده از روش ارائه شدهٔ اندروس و استوکی و جانگ (۲۰۰٤) [۷] ارزیابی شد. سپس با تعیین میزان نشست احتمالی پس از وقوع روان‌گرایی لایه‌های خاکی بر اساس روش آزمون نفوذ استاندارد با استفاده از نتایج پژوهش‌های توکیماتسو و سید (۱۹۸۷) [۱۰] و بر اساس روش سرعت موج برشی با استفاده از نتایج تحقیقات یی (۲۰۰۹) [۱۵]، ارتباط بین شدت خطر روان‌گرایی و میزان نشست بررسی شده. نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر را می‌توان بدین‌صورت بیان کرد:

۱. در مقایسه نتایج حاصل از دو روش بر مبنای مقاومت نفوذ استاندارد و اندازه سرعت موج برشی در برآورد میزان پتانسیل روان‌گرایی در لایه‌های خاکی مشاهده می‌شود که تطابق مناسبی بین آن‌ها موجود نیست و با فرض سیمنته بودن خاک‌ها شاخص خطر برمبنای اندازهٔ سرعت موج برشی میزان بیش‌تری را در مقایسه با روش مقاومت نفوذ استاندارد را ارائه می‌کند. علت‌های این شرایط را بدین‌صورت می‌توان بیان کرد:

الف) چنان‌که آشکار است، برای اصلاح عدد (SPT) از یک‌سری ضرائبی استفاده می‌شود. با توجه به نوع دستگاه حفاری و راندمان انرژی مصرفی و دقت انجام آزمایش، عدم قطعیت‌هایی به‌وجود می‌آید که بر نتایج به‌دست آمده تأثیر می‌گذارد. یکی از موارد تأثیرگذار ضریب اصلاح انرژی دستگاه است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که ضریب مربوط به نسبت انرژی حداقل برای یک یا دو گمانه از گمانه‌هایی که در یک ساختگاه در ایران حفر می‌شود، با سنسورهای مربوطه اندازگیری شود تا میزان دقیق آن برآورد شود.

ب) با توجه به این که درصد کم‌تری تطابق در مورد روان‌گرا و غیرروان‌گرا بودن خاک بین دو روش مشاهده می‌شود در روش ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی با استفاده از سرعت موج برشی، میزان حداکثر سرعت موج برشی برای وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی (V_{S1}^{*}) برای وقوع روان‌گرایی که بر اساس مقدار درصد ریزدانه خاک تعیین می‌شود و از آن در محاسبه مقاومت برشی تناوبی (CRR) استفاده می‌شود ممکن است شرایط مرزی موجود در رابطه با خصوصیات ژئوتکنیکی موجود در محدودهٔ بررسی شده مطابقت نداشته باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

ج) در تعیین مقاومت برشی تناوبی تودهٔ خاک (CRR) پارامتر (C) براساس نوع خاک (سیمنتاسیون یا غیرسیمنتاسیون) محاسبه می‌شود. این امکان وجود دارد که مقدار این پارامتر که اندروس و استوکی (۱۹۹۷) توصیه کرده‌اند برای محدودهٔ بررسی شده مناسب نباشد.

د) لازم بذکر است که در تحقیق حاضر، میزان حداکثر شتاب سطحی برابر ۰/۳۵g و بزرگای زلزله برابر ۷/۵ در نظر گرفته شده است. بنابراین مناسب است به‌دلیل نزدیکی خط ۲ متروی تبریز به گسل شمال تبریز در تحقیقات آینده با به‌طور مناسب تحلیل خطر وقوع زلزله با توجه به تاریخچهٔ زلزله‌های موجود در منطقه، صورت گرفته است و بیشینهٔ شتاب حداکثر و بزرگای زلزله محاسبه شده و بر آن اساس میزان خطر وقوع روان‌گرایی و شدت آن ارزیابی شود.

۲. در مقایسه نتایج حاصل از دو روش بر مبنای مقاومت نفوذ استاندارد و اندازهٔ سرعت موج برشی در برآورد میزان نشست در لایه‌های خاکی پس از وقوع روان‌گرایی در لایه‌های خاکی اشباع مشاهده می‌شود که تطابق مناسبی بین آن‌ها موجود نیست و میان نشست خاک‌ها برمبنای اندازهٔ سرعت موج برشی میزان بیش‌تری را در مقایسه با روش مقاومت نفوذ استاندارد را ارائه می‌کند. اگرچه در هردو روش بین میزان خطر وقوع روان‌گرایی و میزان نشست هماهنگی مناسب مشاهده شده است. علت‌های این شرایط را می‌توان بدین‌صورت بیان کرد:

الف) میزان نشست در لایه‌های خاکی حالت اشباع برمبنای روش آزمون نفوذ استاندارد و اندازهٔ سرعت موج برشی تابع پارامترهای مختلفی مانند میزان تراکم نسبی خاک، کرنش برشی حداکثر و ساختار دانه‌بندی است. به‌طوری‌که هرچه خاک متراکم‌تر است میزان نشست خاک و پتانسیل روان‌گرایی آن کاهش می‌یابد. با افزایش تراکم نسبی میزان کرنش حجمی کاهش می‌یابد. اگرچه میزان کرنش حجمی براساس روش اندازهٔ سرعت موج برشی در مقایسه با نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد تعیین شده است.

ب) با توجه به این‌که در ارزیابی میزان نشست در لایه‌های خاکی پس از وقوع روان‌گرایی با استفاده از سرعت موج برشی در مراحل اولیه تحقیق است مناسب است که در این زمینه تحقیقات گسترده‌تری به‌صورت عددی و آزمایشگاهی انجام شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

ج) با توجه به این‌که در هردو روش ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی و میزان نشست در لایه‌های خاکی معرفی شده در تحقیق حاضر تمامی دیاگرام‌ها و نمودارهای استفاده شده براساس نتایج پژوهش‌های صحرایی انجام شده پس از وقوع روان‌گرایی است. مناسب است که تحقیقاتی به‌صورت گسترده و مناسب انجام شود تا برای خاک‌هایی که تا به امروز روان‌گرایی در آن‌ها مشاهده نشده ولی دارای پتاسیل وقوع براساس مشاهدات صحرایی هستند نمودارهایی ارائه شود.

د) اگرچه ارزیابی پتاسیل روان‌گرایی در لایه‌های خاکی اشباع براساس اندازهٔ سرعت موج برشی یک روش جدید است و بر آن اساس میزان نشست در لایه‌های خاکی اشباع نیز می‌توان تعیین کرد. لیکن با توجه به این‌که مقدار سرعت موج برشی در خاک‌ها با آزمون‌های آزمایشگاهی نیز براورد می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده با برقراری ارتباط بین نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی میزان سرعت موج برشی یک رابطهٔ مناسب برای پیش‌بینی میزان نشست در لایه‌های خاکی در اثر وقوع روان‌گرایی ارائه شود.

منابع

1. Seed H. B., Idriss I. M., "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. 97 (9) (1971) 1249-1273.
2. Seed H. B., Tokimatsu K., Harder L. F., Chung R. M., "The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", Journal of Geotechnical Engineering, 111 (12) (1985) 1425-1445.
3. Idriss I. M., Boulanger R. W., "Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 26 (2006) 115-130.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

4. Idriss I. M., Boulanger R. W., "SPT-based liquefaction triggering procedures, Report no. UCD/CGM-10/02, Center for Geotechnical Modeling", University of California, Davis (2010).

5. Robertson P. K., Wride C. E., "Evaluation Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test", Canadian Geotechnical Journal, 35 (3) (1998) 442-459.

6. Andrus R. D., Stokoe K. H., "Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity", NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER-97-0022, T.L. Youd and I. M. Idriss, Eds, Held 4-5 January 1996, Salt lake City, UT, NCEER, Buffalo, NY (1997)88-128.

7. Andrus R. D., Piratheepan P., Ellis B. S., Zhang J., Juang H. C., "Comparing Liquefaction Evaluation Methods Using Penetration Vs Relationship", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24 (2004) 713-721.

8. Askari F., Dabiri D., Shafiee A., Jafari M. k., "Effects of Non-Plastic Fines Content on Cyclic Resistance and Post Liquefaction of Sand-Silt Mixtures Based on Shear Wave Velocity", Journal of seismology and earthquake engineering, 12(1, 2) (2010) 13-24.

9. Idriss I. M., Boulanger R. W., "Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes", Journal of soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 26 (2006) 115-130.

10. Tokimatsu K., Seed H. B., "Evaluation of Settlements in Sands Due to Earthquake Shaking", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 113(8) (1987) 861-878.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

11. Tokimatsu K., Seed H. B., "Evaluation of Settlements in Sand Due to Earthquake Shaking", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 113 (8) (1987) 861-878.

12. Cetin K. O., Unutmaz B., "Probabilistic Models for the Assessment of Post Cyclic Soil Deformations", 9th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, 1 (2004) 20-31.

13. Ishihara K., Yoshimine M., "Evaluation of Settlement in Sand Deposits Flowing Liquefaction during Earthquakes", Journal of Soils and Foundations, 32(1) (1992) 173-188.

14. Yoshimine M., Nishizaki H., Amano K., Hosono Y., "Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of Flow slide of infinite slope", Soil Dynamic. and Earthquake Engineering., 26(2-4) (2006) 253-264.

15. Yi F., "Procedure to Evaluate Seismic Settlement in Dry Sand Based on Shear Wave Velocity", Manuscript Submitted to the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering (9USN/10CCEE), Toronto, Canada, July 25-29 (2009b) 1-10.

16. Amiranlou H., Pourkermani M., Dabiri R., Qoreshi M. and Bouzari S., "The Stochastic Finite- Fault Modeling based on Dynamic Corner Frequency Simulating of Strong Ground Motion for Earthquake Scenario of Tabriz North Fault", Open journal of Earthquake Research (2016) 1-9.

17. Idriss I. M. "An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential", In: Proceedings, TRB workshop on new approaches to liquefaction, publication no. FHWARD-Federal Highway Administration (1999) 99-165.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]

18. Skempton A. K., "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Partical Size, Aging and over consolidation", Journal of Geotechnique, 36(3) (1986) 425-447.

۱۹. شفیعی علی، عسکری فرج ا.، دبیری روزبه، "بررسی آئین‌نامهٔ اتحادیه اروپا (Euro code 8) در ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌ها در جنوب شرق تهران"، پژوهش‌نامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شمارهٔ سوم، پاییز، شمارهٔ ۳، (۱۳۸۷) ۱٦.

20. Dabiri D., Askari F., Shafiee A., Jafari M. K., "Shear wave velocity based Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: deterministic versus probabilistic approach", Iranian journal of science and technology, Transactions of civil engineering, 35 (C2) (2011) 199-215.

21. Andrus R. D., Stokoe K. H., Juang C. H.,"Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation", Earthquake Spectra (2004) 20-45.

22. Hynes M. E., Olsen R. S., "Influence of Confining Stress on Liquefaction Resistance", Proceeding, International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, held 10-11 September 1998, Baltimore, M.D., A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands (1998).

23. Iwasaki T., Tokida K., Tatsuko F., Yasuda S., "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan", Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco (1978) 885–896.

24. Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H., "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", Proceedings of 2nd International Conference on Microzonation, Seattle, (1982) 1319-1330.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.4.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.183]