



## ارائه مدل احتمالاتی ارزیابی پتانسیل روانگرایی براساس آزمون مقاومت نفوذ مخروط (CPT) در امتداد خط ۲ متروی تبریز

ودود زارع<sup>۱</sup>، روزبه دبیری (نویسنده مسئول)<sup>۲</sup>، رضا عنادلیب<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران [rouzbeh\\_dabiri@iaut.ac.ir](mailto:rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir)

<sup>۳</sup> دکتری مهندسی عمران- مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

یکی از موضوعات مهم در ژئوتکنیک لرزه ای وقوع پدیده روانگرایی در لایه های خاکی اشباع غیر متراکم تحت اثر زلزله می باشد. این رویداد باعث وقوع آسیب های گسترده در سازه های و ابنیه های ژئوتکنیکی سطحی و زیر سطحی می شود. بنابراین برآورد میزان خطر پتانسیل وقوع روانگرایی در محل اجرای سازه های حساس بسیار مهم است. روش های مختلف آزمایشگاهی و صحرایی جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی موجود می باشد. اگرچه امروزه با توجه به عدم قطعیت هایی که در هنگام انجام آزمایش ها موجود می باشد و ممکن است بر روی ارائه نتایج تاثیر گذار باشد از مدل های هوش مصنوعی و احتمالاتی جهت بررسی و تحلیل داده های مورد مطالعه استفاده می شود. هدف از تحقیق حاضر، ارائه یک مدل احتمالاتی جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی براساس نتایج آزمون صحرایی مقاومت نفوذ مخروط (CPT) در امتداد خط ۲ متروی تبریز می باشد. نتایج بدست آمده بیان کننده آن است که شاخص خطر روانگرایی براساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ مخروط (CPT) دارای مقادیر بالایی می باشد. همچنین براساس مدل احتمالاتی ارائه شده، میزان خطر روانگرایی در محدوده مورد مطالعه دارای احتمال بین ۳۳ تا ۶۸ درصد می باشد.

### واژه های کلیدی

روانگرایی، آزمون مقاومت نفوذ مخروط (CPT)، مدل احتمالاتی، خط ۲ متروی تبریز.



## ۱. مقدمه

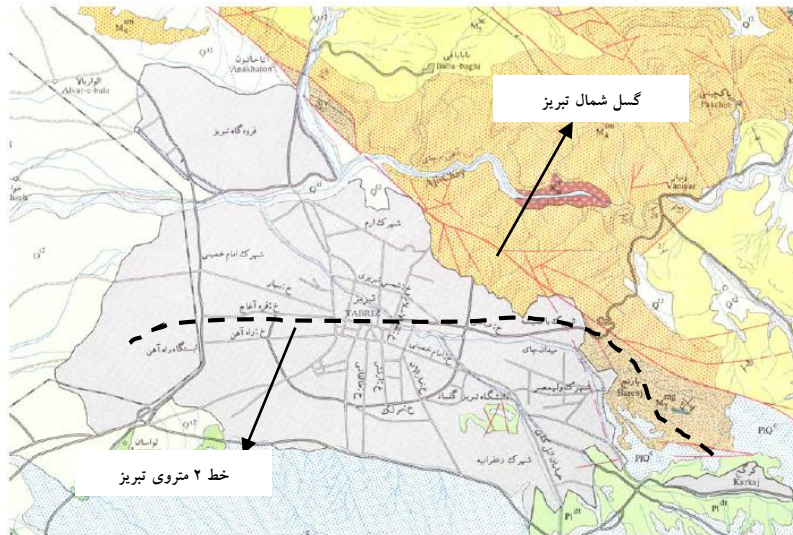
وقتی خاک‌های غیر چسبیده و اشباع و شل در معرض بارهای دینامیکی و ارتعاشات زمین در نتیجه زلزله قرار گیرد تمایل به تراکم پیدا می‌کند. ولی در محدوده دانه‌بندی خاص زهکشی کند صورت گرفته و در خاک به دلیل عدم زهکشی تغییرات حجمی صورت نگرفته و فشار آب منفذی بالا می‌رود؛ و تنش مؤثر به میزان صفر کاهش می‌یابد، بنابراین مقاومت برش خاک کاهش می‌یابد و خاک قدرت باربری خود را از دست می‌دهد. این پدیده گاهی به صورت فوران گل و جوشش ماسه ظاهر می‌گردد. تعیین جنس و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌ها و شناسایی نحوه گسترش آبرفت‌ها در سطح، عمق زمین و عمق آب زیرزمینی نقش اساسی در ارزیابی صحیح قابلیت روانگرایی هر منطقه بر عهده دارد. مقاومت روانگرایی خاک‌ها را می‌توان به روش‌های مختلف آزمایشگاهی مانند برش ساده تناوبی، سه محوری تناوبی و برش پیچشی تناوبی و صحرایی همچون آزمون‌های مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)، مقاومت نفوذ مخروط (CPT)، اندازه‌گیری سرعت موج برشی (VS) تعیین نمود. به هر حال روابط توسعه داده شده با استفاده از روشهای سنتی برپایه داده‌های تجربی محدود شده و پیشبینی درست و پایداری را فراهم نمیکنند و همچنین ضعف عمده روابط ریاضی، ساختار کامل و فضای ناهمگن از خاک و روانگرایی را نشان نمیدهند، در حالی که خاکها ساختارهای کاملاً پیچیده‌ای دارند، که از آن جمله میتوان به مشخصات فیزیکی مبهم و تغییرات نامحدود ایجاد شده توسط ساختار فیزیکی آنها اشاره کرد. بنابراین، مشخصات مکانیکی و دینامیکی خاکها نشان دهنده رفتار غیر قابل اطمینان و متمایز در مقایسه با بیشتر مصالح مهندسی دیگر است. روشهای بررسی ساده تری وجود دارند که اجازه توسعه نامحدود مدل برای تمام سیستمها را می‌دهند، همانند برنامه ریزی ژنتیک (GP)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاج عصبی-فازی (ANFIS). در زمینه کاربرد محاسبات نرم در ارزیابی پتانسیل روانگرایی مطالعات گسترده مختلفی انجام یافته است که می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط (زرین و همکاران، ۱۴۰۰) [۱]، (رفیعی و همکاران، ۱۴۰۱) [۲]، (صاحبکرم و همکاران، ۲۰۲۱) [۳]، (علیزاده و دبیری، ۲۰۲۱) [۴]، (علیزاده و دبیری، ۲۰۲۲) [۵] و (صاحبکرم و همکاران، ۲۰۲۳) [۶] اشاره نمود. هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر اساس عدد مقاومت نفوذ مخروط (CPT) با استفاده از مدل احتمالاتی در امتداد خط ۲ مترو تبریز می‌باشد.

## ۲. شرایط لایه بندی خاک و معرفی محدوده مورد مطالعه

به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی لایه های خاکی و میزان نشست پس از آن، اطلاعات ژئوتکنیکی تعداد ۵۴ حلقه گمانه حفاری شده در امتداد خط ۲ متروی تبریز جمع آوری و مورد استفاده قرار گرفته است. خط ۲ قطار شهری بطول تقریبی ۲۲ کیلومتر از حوالی راه آهن در غرب شهر شروع شده و پس از عبور قراملک و قره‌آعاج به قسمتهای میانی شهر در ناحیه بازار می‌رسد. این خط در ادامه بعد از عبور از میدان دانشسرا و زیر رودخانه مهران رود به خیابان عباسی و میدان شهید فهمیده می‌رسد. از میدان شهید فهمیده به سمت شهرک باغمیشه ادامه یافته و با تغییر مسیر به سمت جنوب شرقی در نهایت به مقابل نمایشگاه بین المللی تبریز ختم می‌شود. این مسیر از ابتدا تا شهر باغمیشه نسبتاً هموار بوده و سپس به سمت شرق حالت تپه ماهوری داشته و توپوگرافی این بخش با پستی و بلندیهای زیادی همراه باشد. در بخش توسعه شرقی اختلاف ارتفاع پست ترین و بلندترین نقطه در طول مسیر حدود ۱۴۰ متر است. سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل اساسی در ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاکها محسوب می‌شود. در طول مسیر پروژه سطح آب زیرزمینی دارای تغییرات زیادی است. به طوری که در یکی از گمانه های حفاری شده آب به صورت آرتزین از سطح گمانه لبریز شده است، در حالی که در بعضی گمانه‌ها تا اعماق زیاد به آب زیرزمینی برخورد نشده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی بعد از تثبیت، زیاد نبوده و بالاترین سطح آب زیرزمینی مربوط به فصل بهار است. در مجموع عمق آب زیرزمینی بین ۲ تا بیش از ۳۰ متر دیده شده است (شکل ۱). تراز آب زیرزمینی از شرق به غرب کاهش پیدا کرده و نشانگر جریان آب زیرزمینی از شرق به سمت غرب بوده و این وضعیت تا حدودی منطبق با شیب دشت تبریز می‌باشد. بررسی ها نشان داده که سفره آب زیرزمینی داخل رسوبات آبرفتی از سفره آب زیرزمینی داخل لایه‌های سنگی بخش شرقی جدا می‌باشد. به عبارت دیگر داخل لایه‌های سنگی نفوذ ناپذیر آبهای قدیمی و گاه تحت فشار و گازدار وجود دارد که به صورت عدسی های محلی بوده و گسترش چندانی ندارند. دلیل وجود آبهای تحت فشار در داخل لایه‌های سنگی، تناوب لایه‌های نفوذ ناپذیر (مثل رس سنگ و مارن) و لایه‌های نفوذپذیر (مثل کنگلومرا) است که آب داخل لایه‌های نفوذپذیر محبوس شده است. برای



ارزیابی سطح ایستابی در گمانه ها در محدوده مورد مطالعه از نقشه های هم عمق آب زیرزمینی دشت تبریز موجود و گزارش سطح آب زیرزمینی در موقعیت حفر گمانه ها استفاده شده است (قاسمیان و همکاران، ۱۳۹۶) [۷].



شکل ۱. نقشه گسل های فعال ناحیه شمال غرب ایران و موقعیت خط ۲ متری تبریز [۷].

برای تحلیل گمانه ها و تعیین پتانسیل خطر روانگرایی در لایه های خاکی بایستی شتاب حداکثر سطح زمین تعیین گردد. با توجه به اینکه گسل شمال تبریز یکی از مهمترین و فعالترین گسلهای منطقه است که در فاصله کمتر از ۵۰۰ متری خط ۲ قطار شهری قرار دارد. این گسل دارای راستای شمال غربی- جنوب شرقی بوده و ساز و کار آن فشاری با شیب زیاد به سوی شمال شرقی است و طول آن را معمولاً ۲۰۰ کیلومتر در نظر گرفته می شود زلزله های بزرگ در ارتباط با فعالیت گسل شمال تبریز روی داده است. میزان حداکثر شتاب سطحی برابر  $g/35$  (دوره بازگشت ۴۷۵ سال و عمر مفید ۵۰ ساله) در نظر گرفته شده است.

### ۳. ارزیابی پتانسیل روانگرایی با استفاده از روش مقاومت نفوذ مخروط (CPT)

ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک های با استفاده از نتایج آزمون مقاومت نفوذ مخروط (CPT)، شامل سه بخش می باشد که شامل پارامترهای نسبت تنش برشی تناوبی توده خاک (CSR)، نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک (CRR)، ضریب اطمینان (FS) است. در تحقیق حاضر، بمنظور تعیین مقاومت نفوذ مخروط در لایه های خاکی، ابتدا نتایج آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (NSPT) موجود در لوگ گمانه ها با استفاده از ضرائب موجود در جدول (۱) و روابط (۱) و (۲) تصحیح شده و میزان عدد SPT معادل ماسه تمیز تعیین گردید. (بود و همکاران-۲۰۰۱) [۸]:

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

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (2)$$

در روابط فوق،  $C_N$ ،  $C_E$ ،  $C_B$ ،  $C_R$  و  $C_S$  ضرائب اصلاحی عدد SPT،  $(N_1)_{60}$ ، عدد SPT اصلاح شده و  $(N_1)_{60CS}$  عدد مقاومت نفوذ استاندارد معادل ماسه تمیز می باشد. پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای اصلاحی بوده که براساس میزان درصد ریزدانه در لایه های خاکی مطابق جدول (۲) انتخاب می شود.



جدول ۱. ضرایب اصلاحی عدد آزمون مقاومت نفوذ استاندارد [۸].

ضرایب	مشخصات تجهیزات	عبارت	ضریب تصحیح
نسبت انرژی	چکش دونات Safety چکش چکش دونات از نوع اتوماتیک	$C_E$	۰/۵-۱ ۱/۲-۱/۷ ۰/۸-۱/۳
قطر گمانه	۱۱۵ تا ۶۵	$C_B$	۱ ۱/۰۵ ۱/۱۵
طول میله	۳-۴ متر ۴-۶ متر ۶-۱۰ متر ۱۰-۳۰ متر بیش از ۳۰ متر	$C_R$	۰/۷۵ ۰/۸۵ ۰/۹۵ ۲۱ <۱
روش نمونه گیری	نمونه گیری استاندارد نمونه گیری بدون پوشش	$C_S$	۱ ۱/۱-۱/۳

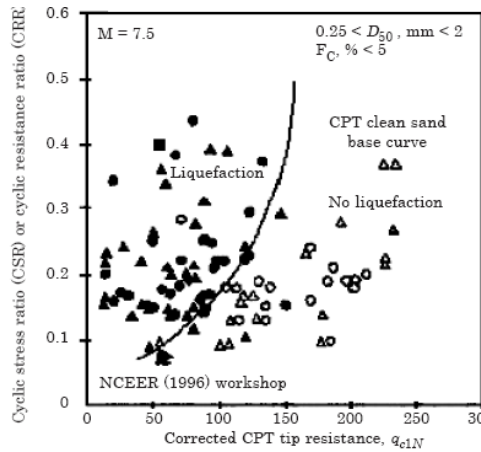
جدول ۲. مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  براساس میزان درصد ریزدانه (یود و همکاران-۲۰۰۱) [۸].

درصد ریز دانه	$FC \leq 5\%$	$5\% < FC \leq 35\%$	$FC > 35\%$
$\alpha$	۰	$e^{[1.76 - (\frac{190}{FC^2})]}$	۵
$\beta$	۱	$\left[0.99 + \left(\frac{FC^2}{1000}\right)\right]$	۱/۲

در انتها، میزان مقاومت نفوذ مخروط اصلاح شده ماسه تمیز با استفاده از رابطه ارائه شده توسط روبرتسون و کامپانلا (۱۹۸۵) [۹] برآورد گردید:

$$(N_1)_{60CS} = 0.488 \cdot (q_{C1N})_{CS}^{0.779} \quad (3)$$

در مرحله اول میزان نسبت مقاومت تناوبی توده خاک (CRR) براساس نتایج آزمون مقاومت نفوذ مخروط اصلاح شده ماسه تمیز  $(q_{C1N})_{CS}$  که با استفاده از رابطه فوق تعیین شده با کاربرد شکل (۲) برآورد می گردد (رابرتسون و رایید، ۱۹۹۸) [۱۰].

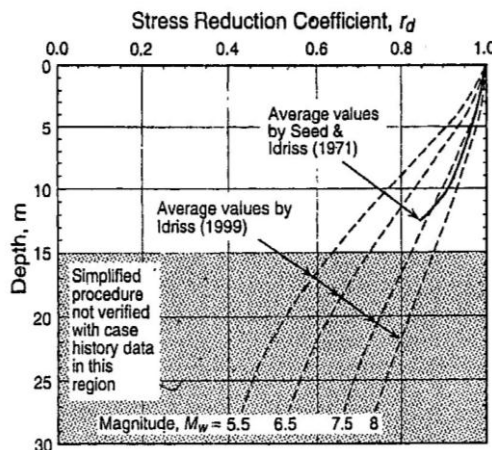


شکل ۲. نمودار تخمین مقاومت برشی تناوبی توده خاک در روش CPT [۱۰].

مرحله دوم ارزیابی پتانسیل روانگرایی، تعیین نسبت تنش برشی تناوبی توده خاک ( $CSR$ )، ایجاد شده توسط زلزله در عمق مورد مطالعه، با استفاده از رابطه (۴) که توسط سید و ادريس در سال ۱۹۷۱ [۱۱] ارائه شد میباشد:

$$CSR = \frac{\tau_{ar}}{\sigma'_v} = 0.65 \left( \frac{a_{Max}}{g} \right) \cdot \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot r_d \quad (4)$$

در رابطه فوق، حداکثر شتاب سطحی،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $\sigma_v$  تنش کل در عمق مورد مطالعه،  $\sigma'_v$  تنش موثر در عمق مورد مطالعه،  $r_d$  ضریب کاهش تنش میباشد که با استفاده از نمودارهای شکل (۳) بدست می آید.



شکل ۳. نحوه تعیین ضریب کاهش تنش (ادريس - ۱۹۹۹) [۱۲].

در مرحله سوم، مقدار ضریب اطمینان در مقابل وقوع روانگرایی از تقسیم مقدار نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک ( $CRR$ ) بر مقدار نسبت تنش برشی تناوبی توده خاک ( $CSR$ )، به دست می آید. در نتیجه اگر  $F_s > 1$  باشد نهشته مورد مطالعه غیر روانگرا و اگر  $F_s \leq 1$  روانگرا می باشد.

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} \quad (5)$$



محققین برای ارزیابی میان خرابی در سطح، روش‌های متعددی ارائه نموده‌اند. از متداول‌ترین روش‌ها، روش ایواساکی و همکاران (۱۹۷۸) [۱۳] می‌باشد که به صورت فرمول زیر ارائه نموده‌اند:

$$PI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(Z) dz \quad (۶)$$

$$F(z) = 1 - F_s \quad (۷)$$

$$W(Z) = 1 - 0.5Z \quad (۸)$$

که در رابطه فوق،  $F(z)$ ، رابطه‌ای که تابع ضریب اطمینان است،  $W(Z)$ ، تابعی است که بر اساس عمق مورد مطالعه ارزیابی می‌گردد. اگر مقدار ضریب اطمینان بزرگ‌تر از یک باشد، در آن صورت میزان PL برابر صفر خواهد بود. همچنین مقادیر مرزی میزان شاخص پتانسیل روانگرایی برای بیان خطر روانگرایی با استفاده از جدول زیر انجام می‌شود:

جدول ۳. تعیین میزان خطر روانگرایی (ایواساکی و همکاران-۱۹۷۸) [۱۳].

خطر روانگرایی و تمهیدات لازم مورد نیاز	PL
خطر روانگرایی خیلی کم است و عموماً نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق نیست	PL = ۰
خطر روانگرایی کم است با این حال نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای سازه‌های مهم می‌باشد.	۰ < PL < ۵
خطر روانگرایی زیاد است نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای انواع سازه می‌باشد. استفاده از روش کاهش مخاطرات روانگرایی معمولاً ضرورت دارد.	۵ < PL < ۱۵
خطر روانگرایی خیلی زیاد است نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق می‌باشد. استفاده از روش کاهش مخاطرات روانگرایی معمولاً ضرورت دارد.	PL > ۱۵

#### ۴. ارزیابی پتانسیل روانگرایی با استفاده از مدل احتمالاتی سه زیگما (3σ)

همانطور که قبلاً ذکر شد، جهت تعیین مقاومت روانگرایی خاکها می‌توان از روشهای آزمایشگاهی و صحرایی استفاده نمود. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در آزمایشهای برآورد پتانسیل روانگرایی در دو دهه اخیر، مطالعات مختلفی بمنظور ارائه مدلهای احتمالاتی تعیین پتانسیل روانگرایی انجام شده است. هدف از ارائه این مدلهای آنستکه اولاً میزان اثر پارامترهای مختلف بر برآورد پتانسیل روانگرایی مشخص گردد، ثانیاً قابلیت اطمینان نتایج به عنوان پارامتر تاثیرگذار در تصمیم‌گیری‌های مهندسی بدست آید. با مرور مطالعات گذشته مشاهده می‌شود که غالب مدلهای احتمالاتی ارائه شده بر پایه نتایج روش‌های صحرایی ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاکها می‌باشد. در تحقیق حاضر، یک مدل بررسی احتمالاتی وقوع روانگرایی خاکها با استفاده از روش تحلیلی سه سیگما (3σ) و بر اساس نتایج آزمون‌های صحرایی ارائه شده است. براساس این روش، که توسط (دای و ونگ، ۱۹۹۲) [۱۴] پیشنهاد شده است. ۹۹/۷۳ درصد مقادیر پارامترهایی که دارای توزیع نرمال می‌باشند به طور میانگین در محدوده سه برابر انحراف معیار نسبت به میانگین قرار گرفته‌اند. خلاصه این روش به شرح زیر می‌باشد:

الف- یک خط مستقیم و یا منحنی از بین داده‌ها عبور داده می‌شود، بطوریکه نشان دهنده مرز میانگین داده‌ها باشد (قبل از رسم میانگین باید داده‌های غیر معتبر یا دارای خطای زیاد را حذف نمود).

ب- دو خط یا منحنی که نشان دهنده حدود بالا و پایین داده‌ها و بر اساس حداکثر و حداقل قابل قبول آنها می‌باشد رسم می‌گردد. لازم بذکر است، که عرض این محدوده بایستی به گونه‌ای باشد که تمام داده‌های آماری معتبر را شامل شود. داده‌هایی که در خارج از این محدوده قرار می‌گیرند غیر معتبر و دارای خطا در نظر گرفته می‌شوند.



ج- خط مستقیم و یا منحنی های مقدار متوسط به اضافه یک انحراف معیار و مقدار متوسط منهای یک انحراف معیار رسم می شوند. این خطوط ، در یک سوم فاصله خطوط میانگین و خطوط بالاترین و پایین ترین حد داده ها قرار دارند. اگر توزیع آماری داده های وقوع پدیده مورد بررسی نرمال باشد(که در ارتباط با بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی چنین است) منحنی میانگین نشان دهنده احتمال ۵۰ درصد، منحنی میانگین به اضافه انحراف معیار نشان دهنده احتمال ۶۸ درصد، منحنی میانگین منهای انحراف معیار نشان دهنده احتمال ۳۲ درصد و منحنی های حد بالا و حد پایین به ترتیب نشان دهنده احتمال وقوع ۹۹ و ۱ درصد می باشند.

#### ۵. ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل داده ها

نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر را می توان بصورت ذیل بیان نمود:

۱- در ۵۴ حلقه لوگ گمانه بررسی شده در امتداد مسیر خط ۲ متری تبریز تا عمق ۲۰ ، نوع خاک در ۱۷۰ مورد ماسه، ۲۱۳ مورد لای و ۲۲ مورد شن بوده است. نتایج حاصل از محاسبات براساس روش آزمون CPT نشانگر آن است که به طور کلی میزان خطر پتانسیل روانگرایی در محدوده خط ۲ متری تبریز زیاد است. بطوریکه ۲۹ درصد از داده ها در محدوده با خطر روانگرایی خیلی زیاد، ۴۱ درصد با خطر روانگرایی زیاد که در مجموع ۷۰ درصد داده ها را شامل میشود و ۳۰ درصد مابقی شامل خطر روانگرایی کم و خیلی کم می باشد. جدول(۴) ، مقادیر شاخص خطر روانگرایی با استفاده از نتایج آزمایش CPT را نشان می دهد.

جدول ۴. شاخص پتانسیل روانگرایی با استفاده از نتایج آزمایش CPT.

شاخص پتانسیل روانگرایی	PL=0	0<PL<5	5<PL<15	PL>15
تعداد	۷	۹	۲۱	۱۵
درصد	۱۳/۴	۱۷/۳	۴۰/۴	۲۸/۹

۲- نتایج حاصل از محاسبات دستی به روش آزمون SPT نشانگر آن است که به طور کلی میزان خاصیت پتانسیل روانگرایی در محدوده خط ۲ متری تبریز زیاد بدست آمده است. بطوریکه ۲۱ درصد در محدوده با خطر روانگرایی خیلی زیاد، ۴۰ درصد با خطر روانگرایی زیاد که در مجموع ۶۱ درصد داده ها را شامل میشود و ۳۹ درصد مابقی شامل خطر روانگرایی کم و خیلی کم میباشد. جدول(۵) شاخص پتانسیل روانگرایی با استفاده از نتایج آزمایش SPT این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۵. شاخص پتانسیل روانگرایی با استفاده از نتایج آزمایش SPT.

شاخص پتانسیل روانگرایی	PL=0	0<PL<5	5<PL<15	PL>15
تعداد	۶	۱۴	۲۱	۱۱
درصد	۱۱/۵	۲۶/۹	۴۰/۴	۲۱/۲

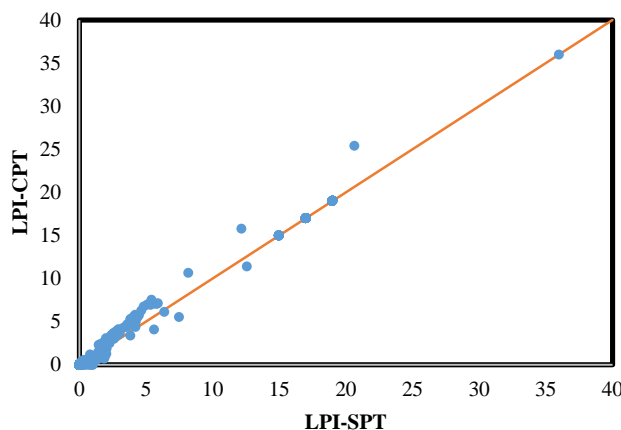
با توجه به نتایج ملاحظه میشود که دو روش دارای اختلافاتی هستند. میزان پتانسیل روانگرایی زیاد در روش CPT بیشتر از روش SPT میباشد. یادآوری میشود که در هر دو روش از فرضیاتی استفاده شده که برخی از مهمترین آنها که ممکن است تفاوت نتایج در دو روش ناشی از آنها باشد عبارتند از:

الف- جهت اصلاح عدد SPT از ضرایبی استفاده شده که بعضاً ممکن است فرضیات بکار برده شده در محاسبه این ضرائب از دقت کافی برخوردار نباشند.

ب- از جمله محدودیتهای SPT میتوان به محدودیت استفاده از آن در نهشته های شنی اشاره نمود. این امر از آن جهت حائز اهمیت است که معمولاً در طبیعت، خاکهای ماسه ای با رسوبات درشت دانه همراه هستند و این رسوبات باعث افزایش غیرعادی نتایج این آزمایش میشود.



۳- با مقایسه شاخص خطر روانگرایی ارزیابی شده با استفاده از روش های آزمون مقاومت نفوذ مخروط (CPT) و آزمون مقاومت نفوذ استاندارد (SPT) مطابق شکل (۴) مشاهده می شود که بین نتایج بدست آمده از دو روش هماهنگی مناسبی موجود می باشد. البته شدت خطر روانگرایی براساس مقاومت نفوذ مخروط اندکی بیشتر می باشد.



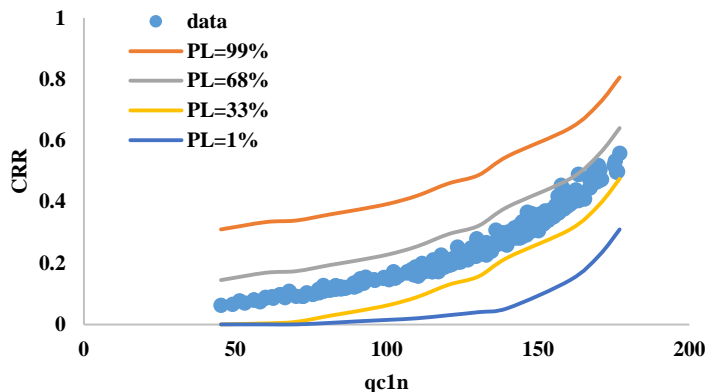
شکل ۴. مقایسه نتایج ارزیابی شاخص روانگرایی با استفاده از دو روش SPT و CPT.

۴- همانطور که قبلاً ذکر شد قانون سه سیگما توسط دای و وانگ (۱۹۹۲) بیان شد که مبتنی بر این واقعیت است که ۹۹/۷۳٪ از همه مقادیر به کار رفته به طور نرمال پارامترهای توزیع شده در سه حالت انحراف استاندارد بطور میانگین قرار گرفته اند. بنابراین اگر HCV بالاترین مقدار ممکن برای یک پارامتر باشد و LCV کمترین مقدار ممکن برای یک پارامتر تقریباً سه انحراف استاندارد بالا و پایین مقدار میانگین وجود دارد. با استفاده از قانون سه سیگما می توان مقدار انحراف استاندارد را تخمین زد که در ابتدا تخمین مقادیر بیشترین و کمترین مقدار ممکن برای پارامتر است و سپس اختلاف این مقدار را به عدد ۶ سیگما تقسیم می کند (معادله ۹).

$$\sigma = \frac{HCV - LCV}{6} \quad (9)$$

مطالعات صورت گرفته نشان داده اند که میزان محدوده تخمینی داده های مابین HCV و LCV بسیار کوچک است. قابل ذکر است که در روش یک، دو سیگما به ترتیب انحراف استاندارد به ترتیب برابر با ۶۸/۲۷٪ و ۹۵/۴۵٪ است که در مقایسه، بیانگر بالا بودن انحراف استاندارد در روش سه سیگماست. با استفاده از قانون سه سیگما مشخص شده است که حتی در مقادیر توزیع شده بصورت غیرنرمال، در ۹۸٪ موارد می توان از قانون سه سیگما استفاده نمود. مطابق شکل (۵) نمودار احتمالاتی ارزیابی پتانسیل روانگرایی براساس روش سه سیگما قابل مشاهده می باشد. با توجه به تحلیل داده ها می توان دریافت با کاربرد روش سه سیگما احتمال وقوع روانگرایی در محدوده مورد مطالعه بین ۳۳ تا ۶۸ درصد می باشد.





شکل ۵. نتایج ارزیابی شاخص روانگرایی با استفاده از روش مقاومت نفوذ مخروط (CPT) با کاربرد روش احتمالاتی سه سیگما.

#### ۶. جمع بندی و نتیجه گیری

بخش وسیعی از خسارتهای ناشی از زلزله مربوط به وقوع پدیده های مختلف ژئوتکنیک لرزه ای می باشد که یکی از آنها روانگرایی ماسه ها و لایه های اشباع غیر متراکم است. هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر اساس عدد مقاومت نفوذ مخروط (CPT) با استفاده از منطق فازی در امتداد خط ۲ مترو تبریز می باشد. در ۵۴ حلقه لوگ گمانه بررسی شده در امتداد مسیر خط ۲ متروی تبریز تا عمق ۲۰، نوع خاک در ۱۷۰ مورد ماسه، ۲۱۳ مورد لای و ۲۲ مورد شن بوده است. نتایج حاصل از محاسبات براساس روش آزمون CPT نشانگر آن است که به طور کلی میزان خطر پتانسیل روانگرایی در محدوده خط ۲ متروی تبریز زیاد است. بطوریکه ۲۹ درصد از داده ها در محدوده با خطر روانگرایی خیلی زیاد، ۴۱ درصد با خطر روانگرایی زیاد که در مجموع ۷۰ درصد داده ها را شامل میشود و ۳۰ درصد مابقی شامل خطر روانگرایی کم و خیلی کم می باشد. همچنین، با کاربرد روش احتمالاتی سه سیگما قابل مشاهده می شود احتمال وقوع روانگرایی در محدوده مورد مطالعه بین ۳۳ تا ۶۸ درصد است که با روش های تجربی مورد استفاده تطابق مناسب ارائه می نماید.

#### منابع

- [۱]- محسن زرین، روزبه دبیری، لاریسا خدادادی، ۱۴۰۰. ارزیابی پتانسیل روانگرایی لایه های خاکی با استفاده از منطق فازی. چهلمین همایش ملی علوم زمین، تهران، ایران، ۱-۱۲.
- [۲]- سعید رفیعی، روزبه دبیری، لاریسا خدادادی، ۱۴۰۱. ارزیابی پتانسیل روانگرایی در لایه های خاکی با کاربرد نتایج آزمون مقاومت نفوذ مخروط (CPT) براساس منطق فازی، دومین کنفرانس بین المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب، دانشگاه هنر اسلامی، تبریز، ایران، ۱-۱۲.
- [3]- Sahebkar, A. A., Dabiri, R., Jani, R., and Sarand, B. F., 2021. Seismic zoning of Tabriz area by stochastic finite fault model considering site-specific soil effects, *Soils and Rocks*, 44, 1, 1-13.
- [4]- Alizadeh Mansuri, M., and Dabiri, R., 2021, Predicting the liquefaction potential of soil layers in Tabriz city via artificial neural network analysis, *SN applied science*, 3, 719, 1-31.
- [5]- Alizadeh Mansuri, M., and Dabiri, R., 2022, Evaluation of Soil Liquefaction Potential by Sensitivity Analysis, Reliability and Data validation (Case Study: Tabriz City), *Journal of engineering geology*, 16, 1, 124-156.
- [6]- Sahebkar, A. A., Dabiri, R., Jani, R., and Sarand, B. F., 2023. Evaluation of Liquefaction Potential Based on Practical Methods and Gene Expressing Programming, *Indian geotechnical journal*, 53, 2, 259-282.
- [۷]- معصومه قاسمیان، روزبه دبیری، رحیم مهاری، ۱۳۹۶. ارزیابی نشست احتمالی ناشی از وقوع روانگرایی در لایه های خاکی در امتداد خط ۲ متروی تبریز، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال ۲۰، ۲، ۱۱-۲۴.



- [8]- Youd, T. L.; Idriss, I. M.; Andrus R. D.; Arango, R. C.; Castro, G.; Christian, J. T.; Dobry, R.; Finn, W. D. L.; Harder, Jr. L. F.; Hynes, M. E.; Ishihara, K.; Koester, J. P.; Liao, S. S. C.; Marcuson, III, W. F.; Martin, G. R.; Mitchell, J. K.; Moriwaki, Y.; Power, M. S.; Robertson, P. K.; Seed, R. B.; Stokoe, II, K. H., 2001, Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127, 10, 297-313.
- [9]- Robertson, P. K., and Campanella R. G., 1985. Liquefaction Potential of Sands using the CPT. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111, 3, 384-403.
- [10]- Robertson P.K., and Wride C. E., 1998, Evaluation Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test, Canadian Geotechnical Journal, 35, 3, 442.
- [11]- Seed H. B. and Idriss I. M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, SM9, 1249-1273.
- [12]-Idriss I. M., 1999. An Update of the Seed-Idriss Simplified Procedure For Evaluation Liquefaction Potential, Presentation Notes for Transportation Research Board Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis, Held 10 Jan. 1999, Washington D.C.
- [13]-Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K. and Yasuda S., 1978. A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan. Proc. of 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, 641-648. 1978.
- [14]- Dai, S. H., and Wang, M. O., 1992. Reliability Analysis in Engineering Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 433.