

# بررسی ارتباط عدد نفوذ استاندارد و احتمال وقوع روان‌گرایی با استفاده از روش اعتمادپذیری در خاک‌های ماسه‌یی

عیسی شوش‌پاشا (استادیار)  
دانشگاه صنعتی بابل

محمدحسین باقری‌پور (استادیار)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مبین افضل‌راد (مربی)  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر

مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف  
تیر ۱۳۸۷، شماره‌ی چهارم و دوم، ص. ۲۲-۲۳

روش‌های ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی در خاک‌های ماسه‌یی، عموماً براساس تحلیل قطعی است. در تحلیل قطعی پارامترها دقیق، بدون پراکندگی و خطا در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، در استفاده از این روش‌ها بین احتمال وقوع روان‌گرایی و ضریب اطمینان ارتباط دقیقی وجود ندارد. پاسخ این مسئله می‌تواند به‌وسیله‌ی تحلیل اعتمادپذیری داده شود. در این نوشتار، تحلیل اعتمادپذیری برپایه‌ی روش معروف «ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی»<sup>[۱]</sup> و استفاده از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد بیان می‌شود. از آنجا که این روش مستلزم کمی‌کردن مقادیر عدم قطعیت‌ها در محاسبات است، می‌توان با استفاده از گشتاورهای آماری مربوط به پارامترهای غیر قطعی — نظیر میانگین، واریانس و تابع چگالی احتمال — محتمل‌ترین مقادیر را در ارتباط با عدم قطعیت آنها محاسبه کرد. آنگاه با استفاده از شیوه‌ی گشتاور دوم — مرتبه‌ی اول پیشرفته (AFOSM)، می‌توان شاخص اعتمادپذیری را محاسبه و ارتباط آن را با احتمال وقوع روان‌گرایی و ضریب اطمینان به دست آورد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌های تکمیل یافته، با استفاده از رگرسیون آماری و براساس نتایج ۱۸۰ رکورد مربوط به ۲۶ گمانه در نقاط مختلف منطقه بابل، رابطه‌ی بین عدد نفوذ استاندارد نرمالیزه شده، نسبت تنش برشی دوره‌یی و احتمال وقوع روان‌گرایی خاک پیشنهاد شده است. رکورد در منطقه‌ی بابل، رابطه‌ی بین مشخصات لرزه‌یی، مقاومت و احتمال وقوع روان‌گرایی خاک پیشنهاد شده است. مقایسه‌های انجام شده به‌خوبی کارایی رابطه‌ی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: آنالیز اعتمادپذیری، پتانسیل روان‌گرایی، شاخص اعتمادپذیری، عدم قطعیت، ضریب اطمینان.

## ۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل خرابی ساختمان‌ها و به‌طور کلی سازه‌ها بر اثر زلزله در مناطقی که بر روی آبرفت‌های دانه‌یی سست و اشباع قرار گرفته‌اند، وقوع پدیده‌ی روان‌گرایی است. معمولاً تنش‌های زلزله در مناطق با ساختار خاک دانه‌یی (ماسه و لای) اشباع، موجب بالا رفتن فشار آب منفذی و در نتیجه کاهش مقاومت خاک شده و نهایتاً خاک حالت روان به خود می‌گیرد. این پدیده به‌صورت نشست چشم‌گیر، ایجاد ترک و بازشدگی، فوران گل و آب، جوشش ماسه و تراوش آب از خلل و فرج موجود در سطح زمین ظاهر می‌شود. به‌دلیل مشکلات و هزینه‌های بالای تهیه‌ی نمونه‌های دست‌نخورده و با کیفیت بالا، و نیز با توجه به حضور روش‌های ساده‌ی مبتنی بر آزمایش‌های درجا (مانند  $SPT$ ،  $CPT$ ،  $BPT$ ) و آزمایش سرعت موج برشی ( $V_s$ )، مهندسی ژئوتکنیک

عموماً این آزمایش‌ها را برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی ترجیح می‌دهند. یکی از روش‌های ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی مبتنی بر آزمایش  $SPT$  است<sup>[۱]</sup>، که در آن معمولاً از شرایط مرزی — شرایطی که منطقه‌ی روان‌گرا را از منطقه‌ی غیر روان‌گرا جدا می‌کند — استفاده می‌شود. شرایط مرزی عموماً به‌صورت تجربی و با محافظه‌کاری بر پایه‌ی مشاهدات روان‌گرایی در زلزله (در مناطقی که اطلاعات آزمایش‌های درجا موجود است) به دست می‌آید. این روش تجربی در بسط شرایط مرزی، قطعاً بسیاری از عدم قطعیت‌ها را وارد محاسبات می‌کند. همچنین بیشتر روش‌های ارزیابی مبتنی بر ضریب اطمینان‌اند و تغییرات مقاومت خاک و بارهای ناشی از زلزله را در نظر نمی‌گیرند و ارتباط دقیقی با احتمال وقوع روان‌گرایی ندارند.

shooshpasha@nit.ac.ir  
bagheri@mail.uk.ac.ir  
mobin.afzalirad@yahoo.com

یک روش جدید و جامع برای بررسی و حل مسئله، وارد کردن عدم قطعیت‌ها در محاسبات تحلیل آماری و مخصوصاً تحلیل اعتمادپذیری است. لذا به منظور کمی کردن عدم قطعیت‌ها می‌توان از گشتاورهای آماری مربوط به پارامترهای غیرقطعی استفاده کرد. در این زمینه پژوهش‌هایی براساس آزمایش‌های  $CPT$  و سرعت موج برشی انجام شده است. [۳۳] همچنین، با استفاده از تحلیل آماری و بر پایه‌ی مشاهدات مناطق روان‌گرا و غیر روان‌گرا در زلزله‌ی  $Chi - Chi$  رابطه‌ی بین احتمال وقوع روان‌گرایی، نسبت تنش برشی دوره‌ی و عدد نفوذ اصلاح شده ارائه شد. [۳۱] با توجه به گستردگی داده‌های میدانی آزمون نفوذ استاندارد در ایران و توسعه‌ی روش‌های آماری، با استفاده از داده‌های آزمون نفوذ استاندارد موجود روشی برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی ارائه می‌شود.

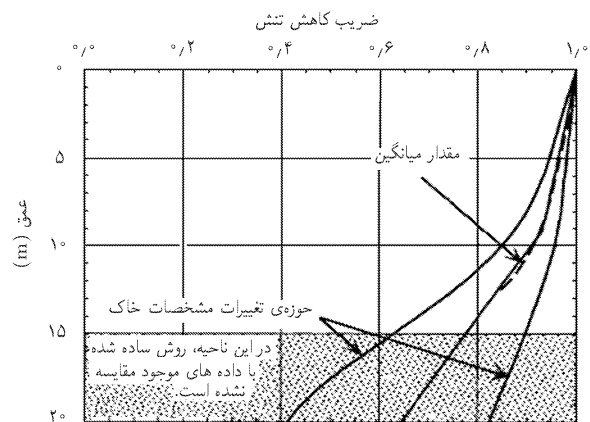
در این مطالعه به منظور ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی، یک رابطه‌ی جدید بر پایه‌ی اعتمادپذیری ارائه می‌شود. رابطه‌ی پیشنهادی براساس نتایج تحلیل اعتمادپذیری ۱۸۵ رکورد در منطقه‌ی بابلسر است که با روش‌های دیگر که مبتنی بر داده‌های مشاهداتی‌اند کنترل و مقایسه شده است. این روش همچنین تصمیم‌گیری مفیدی درخصوص ارتباط ضریب اطمینان با احتمال وقوع روان‌گرایی ارائه می‌دهد که پیشرفتی چشم‌گیر در بیان محاسبه‌ی روان‌گرایی است.

## ۲. نسبت تنش برشی دوره‌ی

یکی از کمیت‌های مورد استفاده برای تشریح خصوصیات روان‌گرایی ماسه در شرایط لرزه‌ی، نسبت تنش دوره‌ی<sup>۱</sup> است. این ضریب عبارت است از نسبت تنش دوره‌ی متوسط ( $\tau_{av}$ ) که بر اثر بارگذاری زلزله در عمق‌های مختلف ایجاد می‌شود، به تنش مؤثر قائم ( $\sigma'_v$ ) در هر عمق که قبل از زلزله به لایه‌ی خاک وارد شده است. [۳۱] برای تعیین نسبت تنش برشی دوره‌ی ( $CSR$ ) رابطه‌ی ۱ پیشنهاد شده است [۳۱]:

$$CSR = \left( \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} \right) = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \left( \frac{\tau_d}{FMS} \right) \quad (۱)$$

که در آن  $a_{max}$  شتاب بیشینه‌ی افقی زلزله،  $\sigma_v$  تنش قائم کل،  $\sigma'_v$  تنش مؤثر قائم،  $\tau_d$  ضریب کاهش تنش ناشی از انعطاف‌پذیری خاک و  $FMS$  ضریب بزرگی زلزله است. تخمین مقادیر  $\tau_d$  با توجه به حرکت‌های مختلف زمین و شرایط خاک در عمق‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. خطای حاصل از استفاده‌ی مقادیر میانگین مشخص شده کم‌تر از ۵ درصد است. در این تحقیق از رابطه‌ی



شکل ۱. محدوده‌ی مقادیر  $\tau_d$  برای عمق‌های مختلف. [۳۱]

ارائه شده توسط مرکز بین‌المللی تحقیقات مهندسی زلزله<sup>۲</sup> برای میانگین مقادیر  $\tau_d$  استفاده می‌شود. [۳۱]

$$r_d = \frac{a}{b} \quad (۲)$$

$$a = (1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}) \quad (۳)$$

$$b = (1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2) \quad (۴)$$

در این رابطه  $z$  عمق لایه‌های خاک از سطح زمین است. پارامتر  $FMS$  باید برای تصحیح نسبت تنش دوره‌ی زلزله‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر از ۷٫۵ ریشتر به‌کار گرفته شود. در این مطالعه از رابطه‌ی ۵ که توسط محققین ارائه شده [۳۱] استفاده می‌شود.

$$FMS = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (۵)$$

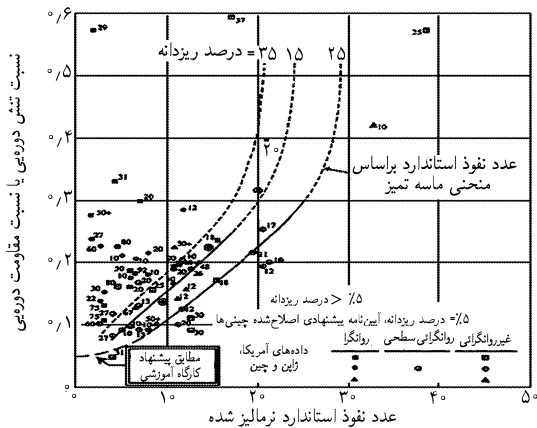
که در آن  $M_w$  بزرگی زلزله براساس گشتاور لرزه‌ی است.

## ۳. نسبت مقاومت برشی دوره‌ی

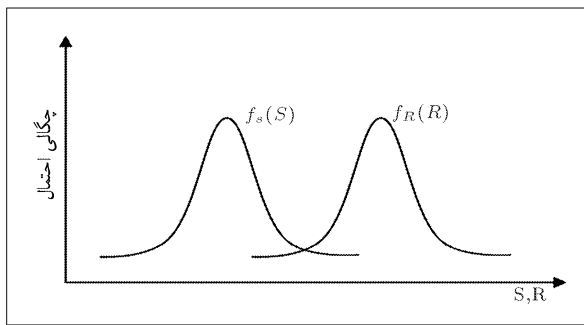
نسبت مقاومت برشی دوره‌ی نیز براساس یکی از مشخصه‌های مقاومت خاک تعیین می‌شود. محققین برای تعیین این پارامتر، براساس عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده‌ی خاک، رفتاری مطابق شکل ۲ ارائه کردند. [۳۱] این رفتار برای ماسه‌ی تمیز به‌شرح رابطه‌ی ۶ تقریب زده شده است: [۳۱]

$$CRR_{v,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[100 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (۶)$$

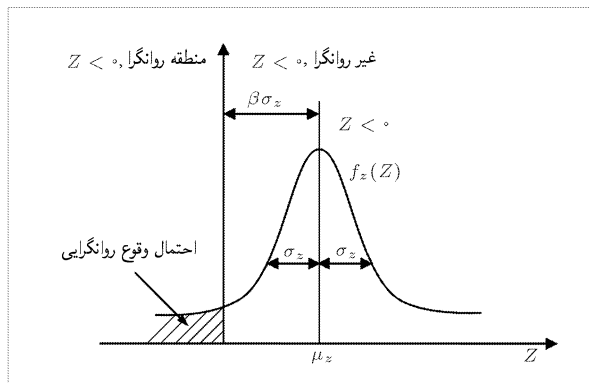
که در آن  $(N_1)_{60}$  عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده، و  $CRR_{v,5}$  نسبت مقاومت دوره‌ی برای زلزله‌های با بزرگی ۷٫۵ ریشتر است. رابطه‌ی ۶ برای مقادیر  $(N_1)_{60} < 30$  صدق می‌کند و  $(N_1)_{60} \geq 30$  برای خاک‌های ماسه‌ی است که به‌اندازه‌ی کافی متراکم‌اند و روان‌گرا نمی‌شوند. لازم به ذکر است که رفتار پیشنهادی محققین براساس مشاهدات روان‌گرایی در زلزله‌های با بزرگی ۷٫۵ ریشتر تهیه شده، که



شکل ۲. رفتار پیشنهادی برای تعیین نسبت مقاومت دوره‌ی براساس عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده. [۳۱]



شکل ۳. تغییرات چگالی احتمال برحسب متغیرهای  $S$  و  $R$ .



شکل ۴. تابع چگالی احتمال مربوط به تابع  $Z$ .

اگر میانگین و انحراف معیار  $R$  و  $S$  به ترتیب  $\mu_R$ ،  $\mu_S$  و  $\sigma_R$ ،  $\sigma_S$  باشند، مقادیر میانگین  $(\mu_Z)$ ، انحراف معیار  $(\sigma_Z)$  و ضریب کوواریانس  $(\delta_Z)$ ، در تابع  $Z$  چنین به دست می‌آیند:

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (10)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (11)$$

$$\delta_Z = \frac{\sigma_Z}{\mu_Z} = \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}{\mu_R - \mu_S} \quad (12)$$

از آنجا که شاخص اعتمادپذیری به عنوان عکس ضریب کوواریانس تعریف می‌شود، می‌توان با اندازه‌گیری این شاخص احتمال وقوع روان‌گرایی را محاسبه کرد:

$$\beta = \frac{1}{\delta_Z} = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (13)$$

اگر متغیرهای  $S$  و  $R$  دارای توزیع نرمال باشند، طبق اصل احتمالات تابع عملکرد  $Z = R - S$  نیز دارای توزیع نرمال  $(\mu_Z, \sigma_Z^2)$   $Z \sim (\mu_Z, \sigma_Z^2)$  به شرح رابطه‌ی ۱۴ است:

$$f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2} \quad (14)$$

با جای‌گذاری رابطه‌ی ۱۴ در رابطه‌ی ۹ می‌توان احتمال روان‌گرایی  $(P_L)$  را به دست آورد:

$$P_L = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2} dz \quad (15)$$

می‌توان آن را برای زلزله‌های با بزرگی‌های مختلف مطابق رابطه‌ی ۵ تصحیح کرد.

برای اعمال تأثیر درصد ریزدانه بر روی  $CRR$  روابط ۷ و ۸ پیشنهاد شده است. این روابط خاک‌های ماسه‌بی حاوی ریزدانه را با ماسه‌ی تمیز معادل‌سازی می‌کند.<sup>[۴]</sup>

$$(N_1)_{FC} = \alpha + \beta(N_1)_{FC} \quad (7)$$

در اینجا  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایبی هستند که مقادیر آنها عبارت است از:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.7 & \text{for } FC \leq 5\% \\ \alpha &= \exp[1.776 - (1.90/FC^2)] & \text{for } 5\% < FC < 35\% \\ \alpha &= 0.7 & \text{for } FC \geq 35\% \\ \beta &= 0.7 & \text{for } FC \leq 5\% \\ \beta &= [0.799 + (FC^{0.5}/1000)] & \text{for } 5\% < FC < 35\% \\ \beta &= 0.7 & \text{for } FC \geq 35\% \end{aligned} \quad (8)$$

در این روابط  $(N_1)_{FC}$  عدد نفوذ استاندارد معادل‌سازی شده براساس ماسه‌ی تمیز و  $FC$  درصد ریزدانه‌ی عبوری از الک ۲۰۰ است.

#### ۴. ارتباط شاخص اعتمادپذیری و پتانسیل روان‌گرایی

در مهندسی ژئوتکنیک و مخصوصاً در تحلیل روان‌گرایی خطای بسیار، نظیر خطای ناشی از پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری شده، خطای سیستماتیک، و خطاهای انسانی بسیاری وجود دارد. بنابراین ارزیابی استعداد روان‌گرایی از روش‌های تحلیل قطعی، به دلیل ناتوانی آنها در به حساب آوردن خطاها زیر سؤال است. لذا لزوم استفاده از تحلیل‌های اعتمادپذیری ضرورت بیشتری می‌یابد.

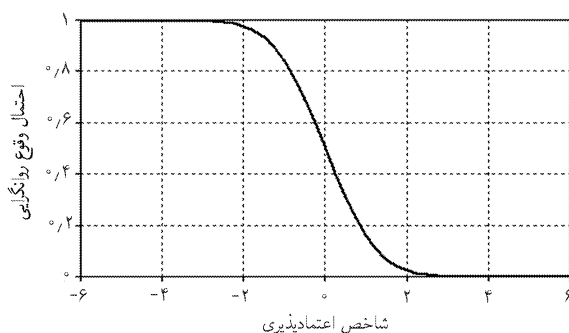
استفاده از شاخص اعتمادپذیری تخمینی مناسب برای برآورد میزان ایمنی در برابر خرابی، در روش‌های تحلیل احتمالات است. این شاخص با در نظر گرفتن جزئیات مقاومت و بارهای وارده بهتر از ضریب اطمینان قادر به ارزیابی ایمنی است. زمانی که شاخص اعتمادپذیری تعریف می‌شود، ایمنی با توجه به مقدار انحراف معیار (یعنی نامعینی در خواص) سنجیده می‌شود. گروهی از مهندسين ژئوتکنیک بر این باورند که ضریب اطمینان دارای مفهوم فیزیکی ضعیفی است و انتخاب مقدار قانع‌کننده‌ی آن دشوار است.

اولین گام در تحلیل اعتمادپذیری تعریف تابع عملکرد است. در روش‌های ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی، اگر  $CRR$  را با پارامتر  $R$  و  $CSR$  را با پارامتر  $S$  نشان دهیم، می‌توانیم تابع عملکرد را به صورت  $Z = R - S$  تعریف کنیم. اگر تابع عملکرد  $Z = R - S < 0$  باشد، به معنی حالت خرابی است و روان‌گرایی اتفاق می‌افتد. از آنجا که بعضی عدم قطعیت‌ها در محاسبه‌ی  $CRR$  و  $CSR$  وجود دارد، متغیرهای  $R$  و  $S$  به عنوان متغیرهای تصادفی مطابق شکل ۳ در نظر گرفته می‌شوند.<sup>[۵]</sup>

متناظراً تابع چگالی احتمال و تابع احتمال تجمعی متغیر  $Z$  به ترتیب با تابع  $f_z(z)$  و  $F_z(z)$  بیان می‌شوند که احتمال روان‌گرایی  $(P_L)$  با سطح زیر رفتار در ناحیه‌ی  $Z = R - S < 0$  برابر است. از این رو:

$$P_L = (Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz = F_z(0) \quad (9)$$

در شکل ۴، احتمال روان‌گرایی به وسیله‌ی منطقه‌ی سایه‌زده در تابع توزیع احتمال  $f_z(z)$  نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییرات پتانسیل روان‌گرایی در برابر شاخص اعتمادپذیری.

با توجه به ثابت بودن پارامترهای  $\mu_z$  و  $\sigma_z$  و با در نظر گرفتن تغییر متغیر  $t = (Z - \mu_z) / \sigma_z$  می‌توان رابطه‌ی ۱۵ را به شکل رابطه‌ی ۱۶ بازنویسی کرد:

$$P_L = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_z}{\sigma_z}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{t^2}{\pi}} dt = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) \quad (16)$$

$$P_L = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (17)$$

که در آن  $P_L$  احتمال وقوع روان‌گرایی،  $\sigma_z$  انحراف معیار و  $\mu_z$  میانگین مقادیر تابع عملکرد،  $\beta$  شاخص اعتمادپذیری و  $\Phi(\beta)$  تابع تجمعی احتمال است. براساس روابط ارائه شده تغییرات پتانسیل روان‌گرایی در برابر شاخص اعتمادپذیری مطابق شکل ۵ است.

### ۵. مدل پیشنهادی برای ارزیابی پتانسیل وقوع روان‌گرایی

در مسائل ژئوتکنیک، «بار» و «مقاومت» اغلب تابعی از چند متغیرند و نمی‌توان شاخص اعتمادپذیری را با روش‌های انتگرال‌گیری مستقیم محاسبه کرد، بلکه باید از شیوه‌های پیشرفته‌تر استفاده نمود. در این تحقیق برای محاسبه‌ی شاخص اعتمادپذیری از شیوه‌ی گشتاور دوم - مرتبه‌ی اول پیشرفته<sup>۳</sup> (رابطه‌ی ۱۸) استفاده شده است. [۱۵ و ۱۶]

$$\beta = \min_{X \in F} \sqrt{(X - m)^T C^{-1} (X - m)} \quad (18)$$

که در آن  $X$  بردار متغیر تصادفی،  $m$  متوسط مقادیر بردارها و  $C$  ماتریس کوواریانس است.

کمینه‌سازی بایستی بر روی دامنه‌ی  $F$  که متعلق به منطقه‌ی تابع عملکرد  $G(X) < 0$  است، انجام‌گیرد. از چندین شیوه‌ی عددی می‌توان برای کمینه‌سازی تابع شاخص اعتمادپذیری استفاده کرد. [۱] یکی از روش‌های بهینه‌یابی، روش نوین الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> است که مبنای طبیعی آن بر رقابت موجودات زنده برای تصاحب منابع محدود طبیعی استوار است. برتری موجودات پیروز مدیون ویژگی‌های فردی آنهاست که تا حد زیادی تحت تأثیر ژن‌های آنها قرار دارد. تولید مثل چنین موجوداتی سبب تکثیر این ژن‌ها و در نتیجه تولید فرزندانی شایسته خواهد شد. با انجام متوالی انتخاب بهترین اعضا و تولید مثل آنها کل جمعیت به سوی سازش بیشتر با محیط، یعنی دست‌یابی به منابع بیشتر و بهتر، سوق خواهد یافت. الگوریتم ژنتیک با مدل‌سازی ریاضی چرخه‌ی طبیعی فوق، توابع بهینه‌ی مقید ریاضی را محاسبه می‌کند. [۱۵ و ۱۶] در واقع این روش فقط به اطلاعات مربوط به کیفیت هر پاسخ نیاز دارد، در حالی‌که اکثر روش‌های بهینه‌یابی به مشتقات مسئله — که ممکن است به دست آوردن آنها در مسائل مختلف مانند مسئله‌ی اعتمادپذیری ساده نباشند — نیز نیاز دارند. این

در حالی است که الگوریتم ژنتیک به جزئیات مربوط به مسئله احتیاجی ندارد [۱۷] و بنابراین نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌یابی انعطاف‌پذیرتر است. از مزایای این روش آن است که دارای سازوکار آسان در استفاده از رایانه است و در تحقیق حاضر با شبیه‌سازی مسئله توسط نرم‌افزار *Matlab* این کار صورت گرفته است.

همان‌طور که توضیح داده شده برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی می‌توان تابع عملکرد را به صورت  $G(X) = CRR/CSR - 1$  در نظر گرفت. با توجه به روابط ارائه شده متغیرهای  $\sigma_v$ ،  $\sigma'_v$ ،  $\sigma_{v,max}$ ،  $M_w$  و  $(N_v)_{p+CB}$  به عنوان متغیر تصادفی عمل می‌کنند. البته پارامترهای  $\sigma_v$ ،  $\sigma'_v$ ،  $\sigma_{v,max}$ ،  $M_w$  همبستگی بالایی دارند که باید در محاسبات لحاظ شود. بنابراین با بسط رابطه‌ی ۱۸ خواهیم داشت:

$$\beta^2 = \min_{X \in F} [X_1 - m_1 X_2 - m_2 X_3 - m_3 X_4 - m_4 X_5 - m_5]$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 & \sigma_{v,3} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v,2} & \sigma_v^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_v^2 & \sigma_{v,5} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{v,4} & \sigma_v^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_1 - m_1 \\ X_2 - m_2 \\ X_3 - m_3 \\ X_4 - m_4 \\ X_5 - m_5 \end{bmatrix} \quad (19)$$

که:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (20)$$

بعد از بسط و جای‌گذاری رابطه‌ی ۲۰ در رابطه‌ی ۱۹ خواهیم داشت:

$$\beta^2 = \min_{G(X) < 0} \left\{ \left[ \frac{(X_1 - m_1)^2}{\sigma_v^2} \right] + \left[ \frac{(X_2 - m_2)^2}{\sigma_v^2} - 2 \frac{(X_2 - m_2)(X_3 - m_3)\rho_{23} + (X_2 - m_2)^2}{\sigma_v \sigma_3} \right] \left( \frac{1}{1 - \rho_{23}^2} \right) + \left[ \frac{(X_3 - m_3)^2}{\sigma_v^2} - 2 \frac{(X_3 - m_3)(X_5 - m_5)\rho_{35} + (X_3 - m_3)^2}{\sigma_v \sigma_5} \right] \left( \frac{1}{1 - \rho_{35}^2} \right) \right\} \quad (21)$$

که در آن  $X_1$  متغیر تصادفی  $(N_v)_{p+CB}$ ،  $X_2$  متغیر تصادفی  $\sigma_v$ ،  $X_3$  متغیر تصادفی  $\sigma'_v$ ،  $X_4$  متغیر تصادفی  $\sigma_{v,max}$ ،  $X_5$  متغیر تصادفی  $M_w$ ،  $\rho_{23}$  ضریب همبستگی بین متغیرهای  $X_2$  و  $X_3$ ،  $\rho_{25}$  ضریب همبستگی بین متغیرهای  $X_2$  و  $X_5$ ،  $\sigma_i$  (که در آن  $i = 1, \dots, 5$  تغییر می‌کند) انحراف معیار هر یک از متغیرها،  $\sigma_{x,y}$  کوواریانس بین دو متغیر  $x$  و  $y$  و  $G(X) < 0$  تابع عملکرد است. ملاحظه می‌شود در شرایطی که تعداد متغیرهای تصادفی زیاد، وابسته و تابع عملکرد غیرخطی باشد، می‌توان برای محاسبه‌ی  $\beta$  از روش *AFOSM* استفاده کرد و احتمال خرابی را از رابطه‌ی ۱۷ محاسبه کرد.

### ۶. متغیرهای تصادفی

متغیرهای تصادفی  $\sigma_v$ ،  $\sigma'_v$ ،  $\sigma_{v,max}$ ،  $M_w$  و  $(N_v)_{p+CB}$  در نظر گرفته شده در این مطالعه، با ذکر جزئیات در جدول ۱ ارائه شده است. میانگین متغیرهای  $\sigma_v$ ،  $\sigma'_v$  و  $\sigma_{v,max}$ ، از ۱۸ مورد مطالعه مورد محاسبه شده است. همچنین ضرایب پراکنندگی متغیرهای  $\sigma_v$  و  $\sigma'_v$  با توجه به تغییرات وزن مخصوص خاک، که

جدول ۱. متغیرهای تصادفی و مشخصات در نظر گرفته شده.

تابع توزیع	ضریب پراکندگی $[I_{3,3}]$	میانگین	متغیر تصادفی
نرمال	۰٫۳	۲۰	$(N_1)_{\sigma_{cs}}$
نرمال	۰٫۱	*	$\sigma_v$
نرمال	۰٫۱۵	*	$\sigma'_v$
نرمال	۰٫۱۵	۰٫۳۶	$a_{max}$
نرمال	۰٫۱۵	۶٫۳	$M_w$

\* مقادیر میانگین در هر عمق محاسبه شده است.

جدول ۲. ضرایب همبستگی بین متغیرها.

$[I_{3,3}]M_w$	$[I_{3,3}]a_{max}$	$\sigma'_v$	$\sigma_v$	$(N_1)_{\sigma_{cs}}$	
۰	۰	۰	۰	۱٫۰۰	$(N_1)_{\sigma_{cs}}$
۰	۰	۰٫۹۵	۱٫۰۰	۰	$\sigma_v$
۰	۰	۱٫۰۰	۰٫۹۵	۰	$\sigma'_v$
۰٫۹۰	۱٫۰۰	۰	۰	۰	$a_{max}$
۱٫۰۰	۰٫۹۰	۰	۰	۰	$M_w$

## ۷. کاربرد مدل پیشنهادی

در این تحقیق پتانسیل وقوع روان‌گرایی در منطقه‌ی بابلسر، واقع در نوار ساحلی دریای خزر، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. شهرستان بابلسر در میان گسل‌های مهمی واقع شده است که توان لرزه‌ی بالایی دارند و زلزله‌هایی با بزرگی ۶٫۳ در این منطقه قابل پیش‌بینی است.  $I_{3,3}$  از مهم‌ترین این گسل‌ها می‌توان به گسل خزر، گسل البرز شمالی و خطواره بابل اشاره کرد. با توجه به رسوبات آبرفتی ساحلی و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، این منطقه برای روان‌گرایی از پتانسیل بالایی برخوردار است.  $I_{3,3}$  در این پژوهش از اطلاعات گمانه‌های حفار شده در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شده است. عمق حفاری در این گمانه‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ متر و عمق آب زیرزمینی ثبت‌شده نیز حدوداً بین ۰٫۵ تا ۴٫۵ متر در نوسان است.

در این مطالعه حدود ۱۸۰ رکورد مربوط به ۲۶ گمانه از نقاط مختلف با استفاده از برنامه‌ی رایانه‌ی که در نرم‌افزار *Matlab* نوشته شده تحلیل شد. برای هر حالت *CRR*، *CSR*، شاخص اعتمادپذیری و احتمال وقوع روان‌گرایی به‌طور پیوسته در تمامی عمق‌ها محاسبه شده است. خلاصه‌ی اطلاعات و مطالعات انجام شده در جدول ۳ است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب اطمینان در ردیف ۹ بزرگ‌تر از یک است که بیانگر عدم وقوع روان‌گرایی است، در حالی که احتمال وقوع روان‌گرایی در ردیف پیشنهادی ۳۸٪ است. براساس طبقه‌بندی خطر روان‌گرایی مبتنی بر احتمال  $I_{3,3}$  و به شرح جدول ۴، رخداد روان‌گرایی محتمل است. ضمناً ضرایب اطمینان در ردیف‌های ۸ و ۱۶ جدول ۳، به ترتیب ۰٫۸۷ و ۰٫۸۵ است که احتمال وقوع روان‌گرایی متناظر با آن ۶۰٪ و ۵۴٪ است. بنابراین، ضریب اطمینان بزرگ‌تر لزوماً به معنی ایمنی بیشتر و در نتیجه ریسک خرابی کم‌تر نخواهد بود. از مقایسه‌ی ردیف‌های ۴ و ۲۰ نیز نتیجه‌ی مشابه حاصل می‌شود.

در منطقه‌ی مورد مطالعه عموماً از  $21 - 15 \text{ KN/m}^2$  متغیر است، تخمین زده شده است.

از آنجا که بعضی از متغیرها همبستگی دارند، در جدول ۲ ضریب همبستگی بین متغیرهای ورودی نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین متغیرهای  $\sigma'_v$  و  $\sigma_v$  براساس رکوردهای منطقه‌ی مورد مطالعه و با توجه به رابطه‌ی ۲۰ محاسبه شده است؛ اما در مورد ضریب همبستگی بین دو متغیر  $a_{max}$  و  $M_w$  با توجه به این که اطلاعات لرزه‌ی در منطقه‌ی مورد مطالعه وجود نداشت، از ضرایب اشاره شده در دیگر منابع استفاده شده است.  $I_{3,3}$

جدول ۳. خلاصه اطلاعات و محاسبات روان‌گرایی در منطقه‌ی مورد مطالعه.

ردیف	عمق (m)	نوع خاک	$\sigma_v T/m^2$	$\sigma'_v T/m^2$	$(N_1)_{\sigma_{cs}}$	$a_{max}$	$M_w$	CRR	CSR	FS	$\beta$	$P_L(\%)$
۱	۱۸	SP-SM	۳۶٫۰۰	۱۹٫۰۰	۲۲	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۵	۰٫۱۹	۱٫۳۰	۱٫۱۸	۱۲
۲	۴	SP	۸٫۰۰	۶٫۰۰	۷	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۰۹	۰٫۱۹	۰٫۴۵	-۱٫۹۰	۹۷
۳	۴	SM	۷٫۸۲	۶٫۵۹	۱۲	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۳	۰٫۱۷	۰٫۷۷	-۰٫۸۰	۷۹
۴	۶	SM	۱۱٫۸۲	۸٫۵۹	۲۰	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۱	۰٫۲۰	۱٫۰۹	۰٫۶۵	۲۶
۵	۷	SP	۱۴٫۰۰	۹٫۰۰	۸	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۰	۰٫۲۲	۰٫۴۳	-۱٫۸۰	۹۶
۶	۱۱	SP-SM	۲۱٫۸۲	۱۳٫۵۹	۲۲	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۴	۰٫۲۱	۱٫۱۲	۰٫۸۶	۱۹
۷	۱۶	SP-SM	۳۱٫۸۲	۱۸٫۵۹	۱۳	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۴	۰٫۱۹	۰٫۷۳	-۰٫۷۳	۶۹
۸	۳٫۵	SP	۷٫۰۴	۵٫۰۴	۱۷	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۸	۰٫۲۰	۰٫۸۷	-۰٫۲۵	۶۰
۹	۱۶	SP-SM	۳۲٫۰۰	۲۲٫۶۹	۱۵	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۶	۰٫۱۵	۱٫۰۳	۰٫۳۰	۳۸
۱۰	۳	SP	۴٫۵۳	۳٫۳۳	۲۱	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۲	۰٫۲۰	۱٫۱۱	۰٫۶۸	۲۵
۱۱	۴٫۵	SP-SM	۷٫۰۵	۴٫۳۵	۵	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۰۷	۰٫۲۴	۰٫۳۱	-۲٫۵۳	۹۹
۱۲	۱۲	SP	۲۳٫۳۷	۱۲٫۸۷	۱۸	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۹	۰٫۲۳	۰٫۸۲	-۰٫۱۵	۵۶
۱۳	۴	SP	۷٫۸۰	۶٫۳۵	۱۲	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۳	۰٫۱۸	۰٫۷۲	-۰٫۹۰	۸۲
۱۴	۱۷	SM	۳۴٫۱۹	۱۸٫۶۹	۲۱	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۲	۰٫۱۹	۱٫۱۷	۱٫۰۵	۱۵
۱۵	۱۰	SP-SM	۱۹٫۸۲	۱۲٫۵۹	۲۰	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۱٫۰۰	۰٫۴۲	۳۴
۱۶	۲۱	SM	۳۳٫۶۰	۱۵٫۱۰	۱۶	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۸۵	-۰٫۱۰	۵۴
۱۷	۶٫۵	SM	۱۳٫۰۰	۹٫۵۰	۱۴	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۷۸	-۰٫۷۰	۷۶
۱۸	۳	SP-SM	۶٫۰۰	۴٫۵۰	۱۳	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۴	۰٫۲۰	۰٫۷۱	-۰٫۸۸	۸۱
۱۹	۱۱	SP-SM	۲۲٫۰۰	۱۴٫۰۰	۹	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۱۱	۰٫۲۱	۰٫۵۲	-۱٫۵۹	۹۴
۲۰	۵	SP	۱۰٫۰۰	۷٫۵۰	۱۹	۰٫۳۶	۶٫۳	۰٫۲۱	۰٫۱۹	۱٫۰۸	۰٫۸۴	۲۰

جدول ۴. طبقه‌بندی رخداد روان‌گرایی. [۱۵]

طبقه‌بندی	احتمال روان‌گرایی (P <sub>L</sub> )	توضیحات
۱	$P_L < 15$	به‌طور قطع روان‌گرایی رخ نمی‌دهد
۲	$15 \leq P_L < 35$	رخداد روان‌گرایی بعید است
۳	$35 \leq P_L < 65$	رخداد روان‌گرایی و عدم رخداد روان‌گرایی به‌طور مساوی محتمل است
۴	$65 \leq P_L < 85$	رخداد روان‌گرایی خیلی محتمل است
۵	$P_L \geq 85$	قطعاً روان‌گرایی رخ می‌دهد

زلزله‌ی  $Chi - Chi$  است، مقایسه شد که خلاصه‌ی آن در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده از دقت خوبی برخوردار است و با داده‌های مشاهده‌شده همخوانی خوبی دارد.

رفتار تغییرات احتمال روان‌گرایی ( $P_L$ ) در عمق‌های مختلف حاصل از نمونه تحلیل صورت‌گرفته، با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی بر روی گمانه‌ها مطابق شکل ۶،

جدول ۵. مقایسه‌ی احتمال وقوع روان‌گرایی با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی با روش ارائه شده توسط هاوانگ.

ردیف	$(N_1)_{F=CS}$	CSR	رابطه‌ی پیشنهادی $P_L$ (%)	$[P_L]^{[5]}$ (%)	درصد خطا
۱	۲۲	۰٫۱۹	۱۱	۱۳	۰٫۱۸
۲	۷	۰٫۱۹	۹۷	۹۲	۰٫۰۵
۳	۱۲	۰٫۱۷	۷۴	۶۶	۰٫۱۱
۴	۲۰	۰٫۲۰	۲۴	۲۶	۰٫۰۸
۵	۸	۰٫۲۲	۹۸	۹۴	۰٫۰۴
۶	۲۲	۰٫۲۱	۱۶	۱۸	۰٫۱۳
۷	۱۳	۰٫۱۹	۷۷	۶۹	۰٫۱۰
۸	۱۷	۰٫۲۰	۴۹	۴۶	۰٫۰۶
۹	۱۵	۰٫۱۵	۳۵	۳۴	۰٫۰۳
۱۰	۲۱	۰٫۲۰	۱۸	۲۰	۰٫۱۱
۱۱	۵	۰٫۲۴	۹۹	۹۸	۰٫۰۱
۱۲	۱۸	۰٫۲۳	۵۶	۵۲	۰٫۰۷
۱۳	۱۲	۰٫۱۸	۷۹	۷۰	۰٫۱۱
۱۴	۲۱	۰٫۱۹	۱۵	۱۷	۰٫۱۳
۱۵	۲۰	۰٫۲۱	۲۹	۳۰	۰٫۰۳
۱۶	۱۶	۰٫۲۰	۵۸	۵۳	۰٫۰۹
۱۷	۱۴	۰٫۲۰	۷۴	۶۷	۰٫۰۹
۱۸	۱۳	۰٫۲۰	۸۱	۷۳	۰٫۱۰
۱۹	۹	۰٫۲۱	۹۶	۹۱	۰٫۰۵
۲۰	۱۹	۰٫۱۹	۲۷	۲۸	۰٫۰۴
۰٫۰۸			میانگین درصد خطا		

## ۸. رابطه‌ی استخراجی از مدل پیشنهادی

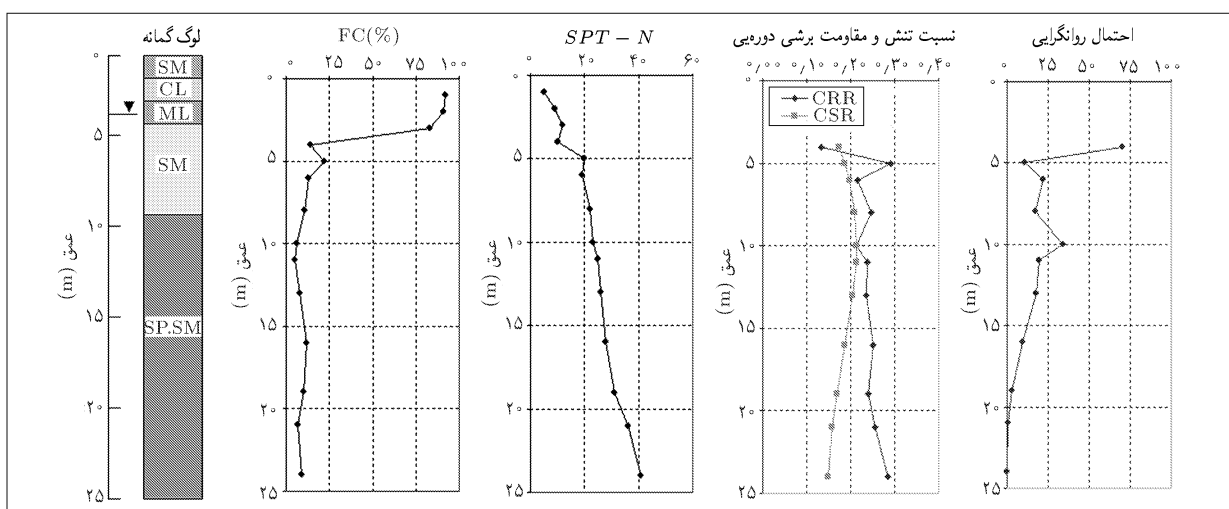
برای سهولت استفاده از روش پیشنهادی توسط مهندسین ژئوتکنیک در کارهای مهندسی، در این پژوهش رابطه‌ی بین مشخصات لرزه‌یی، مقاومت خاک و پتانسیل روان‌گرایی ارائه شد. پتانسیل روان‌گرایی به پارامترهای مختلف مانند: تنش مؤثر خاک ( $\sigma'_v$ )، تنش کل خاک ( $\sigma_v$ )، شتاب افقی بیشینه‌ی زلزله ( $a_{max}$ )، عمق لایه‌های خاک ( $z$ )، بزرگی زلزله ( $M_W$ ) و تعداد ضربات نفوذ استاندارد اصلاح شده براساس ماسه‌ی تمیز  $(N_1)_{F=CS}$  بستگی دارد. این پارامترها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: پارامترهای مقاومتی خاک و پارامترهای لرزه‌یی، که با انتخاب دو پارامتر  $(N_1)_{F=CS}$  و  $CSR$  می‌توان تمام پارامترهای مؤثر بر پتانسیل روان‌گرایی خاک را تشریح کرد.

با بهره‌گیری از برنامه‌ی رایانه‌ی نوشته‌شده در *Matlab*، روش پیشنهادی برای ۱۸۰ رکورد در منطقه‌ی بابلسر با متغیرهای مختلف به‌کار گرفته شد. با رگرسیون غیرخطی چندمتغیره ارتباط متغیرها براساس تحلیل اطلاعات عبارت است از:

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-(1375285 + 0.3562(N_1)_{F=CS} - 0.00003(N_1)_{F=CS}^2 + 4.6113 \ln(CSR))] ]} \quad (22)$$

که ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و متوسط خطاها برای رابطه‌ی پیشنهاد شده به ترتیب ۰٫۹۶ و ۱۰٪ است.

برای کنترل عملکرد مدل پیشنهادی، رابطه‌ی ۲۱ با روش ارائه‌شده توسط هاوانگ<sup>[۱۵]</sup>، که مبتنی بر داده‌های مشاهده‌شده در مناطق روان‌گرا و غیر روان‌گرا در



شکل ۶. ارزیابی پتانسیل وقوع روان‌گرایی مربوط به یک گمانه.

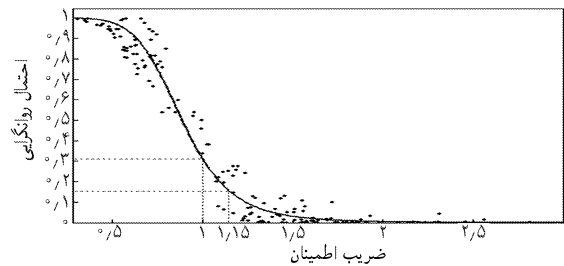
است. وقتی  $FS$  از ۱ تا ۱/۲۵ تغییر می‌کند، تأثیر عدم قطعیت در محاسبات پرمعنی می‌شود و احتمال وقوع روان‌گرایی به‌طور مؤثر در قبال تغییرات کوچک در  $FS$  تغییر می‌کند. برای مثال اگر  $PL < ۱۵$  باشد، روان‌گرایی قطعاً رخ نمی‌دهد (۱۸۵)، که معادل با ضریب اطمینان ۱/۲۱۵ است.

## ۱۰. نتیجه‌گیری

در این مطالعه چهارچوبی برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی ارائه شد. با توجه به هم‌خوانی روش پیشنهادی با روش‌های مبتنی بر مشاهدات، این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی مورد استفاده‌ی مهندسی قرار گیرد. از مطالعات حاضر مشخص می‌شود که ضریب اطمینان بزرگ‌تر از ۱ حاصل از مطالعات روان‌گرایی، لزوماً به‌معنی ایمنی بیشتر نیست بلکه قضاوت نهایی باید همراه با درصد احتمال بروز روان‌گرایی صورت گیرد.

براساس رابطه‌ی ارائه‌شده بین  $CSR$ ،  $PL$  و  $(N_v)_{eq}$  می‌توان به‌طور مستقیم پتانسیل وقوع روان‌گرایی را با میانگین خطای کم‌تر از ۰/۱۰ نسبت به داده‌های مشاهداتی محاسبه کرد. از آنجا که مقدار عدم قطعیت‌های به‌کارگرفته در محاسبات عموماً برای مناطق واقع در نوار ساحلی دریای خزر یکسان است، می‌توان از این رابطه برای سایر نقاط نیز استفاده کرد.

رابطه‌ی ارائه‌شده بین  $FS$  و  $PL$ ، تصمیم‌گیری بر پایه‌ی ریسک روان‌گرایی لایه‌های خاک را با استفاده از روش‌های قطعی امکان‌پذیر می‌کند. برای مهندسی ژئوتکنیک استفاده از روش‌های رایج مبتنی بر ضریب اطمینان به‌منظور ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی یک امتیاز بزرگ است. الگوریتم طراحی شده در این تحقیق را می‌توان با حفظ کلیات و داشتن اطلاعات مورد نیاز، برای مناطق دیگر نیز تعمیم داد.



شکل ۷. رفتار تغییرات ضریب اطمینان به احتمال روان‌گرایی.

راهنمای بسیار خوبی برای پی‌بردن مهندسی ژئوتکنیک به میزان ریسک استعداد روان‌گرایی لایه‌های خاک است.

## ۹. پتانسیل وقوع روان‌گرایی و ضریب اطمینان

بزرگ‌ترین نتیجه‌ی حاصل از محاسبه‌ی روان‌گرایی بر پایه‌ی اعتمادپذیری این است که محاسبه‌ی احتمال وقوع روان‌گرایی با استفاده از ضریب اطمینان به‌طور کیفی ممکن است. ضریب اطمینان به احتمال وقوع روان‌گرایی برای ۱۸۰ رکورد در منطقه‌ی مورد مطالعه در شکل ۷ ارائه شده است.

ارتباط بین  $FS$  و  $PL$  با ضریب همبستگی  $R^2 = ۰/۹۵۶۷$  را می‌توان در رابطه‌ی ۲۲ توصیف کرد.

$$PL = \frac{1}{1 + (FS/۰/۸۸۷۶)^{۰/۵۷۳}} \quad (۲۳)$$

شکل ۷ و رابطه‌ی ۲۲ نشان می‌دهد که وقتی  $PL$  به صفر نزدیک می‌شود ضریب اطمینان ( $FS$ ) از ۲/۲۵ تجاوز نمی‌کند، که یک طرح محافظه‌کارانه و گران

## پانویس

1. cyclic stress ratio
2. National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER)
3. advanced first-order second-moment
4. Genetic Algorithm

## منابع

1. Seed, H.B.; Tokimatsu, K.; Harder, L.F. and Chung, R. "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", *J. Geotech. Eng. Civ., Am. Soc. Div. Eng.*, **111**(12), pp. 1425-1445 (1985).
2. Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *J. Soil Mech. Found. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, **97**(9), pp. 1249-1273 (1971).
3. Juang C.H., Rosowsky D.V. and Tang W.H. "Reliability based method for assessing liquefaction potential of

soils", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **125**(8), pp. 684-689, (1999).

4. Juang C.H.; HuiYang, S. and Yuan, H. "Model uncertainty of shear wave velocity-based method for liquefaction potential evaluation", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **131**(10), pp. 1274-1281 (2005).
5. Hwang, J.H.; Yang, C.W. and Juang D.S. "A practical reliability-based method for assessing soil liquefaction potential", *J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, pp. 761-770 (2004).
6. Youd, T.L. and Idriss, I.M. "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* **127**(10), pp. 817-833 (2001).
7. Baecher G.B. and Christian J.T. "Reliability and statistics in geotechnical engineering", John Wiley (2003).
8. Low, B.K. and Tang, W.H. "Efficient reliability evaluation using spreadsheet", *J. Engng. Mech. ASCE*, **123**(7), pp. 749-752 (1997).

9. Krishakumer, K. and Goldberg, D.E. "Control system optimization using genetic algorithms", *J. of Guidance Control and Dynamics*, **15**(3), pp. 735-740 (1992).
10. Goldberg, D.E. "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley publishing Co (1989).
11. McCully, C. and Bleobaum, C.L. "A genetic tool for optimal design sequencing in complex eng. System", *Structural optimization*, **12**, pp. 186-201 (1996).
12. Shahpasandzadeh, M. and Zare, M. "A preliminary study of seismicity, seismotectonics and earthquake-fault hazard in the Mazndaran province", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (1995).
13. Khoshneviszadeh, M. and Shooshpasha, I. "A study on liquefaction phenomena in south cost of the Caspian sea", Proceeding of 6th International Conference on Civil Engineering, Esfehan Industrial University, May 3-5, Esfahan. Iran (2003). (In Persian)
14. Kulhawy, F.H. and Tautmann, C.H. "Estimation of in situ test uncertainty", Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice, Geotechnical Special Publication, No. 58, ASCE, New York, pp. 269-286 (1996).
15. Chen, C.J. and Juang, C.H. "Calibration of SPT and CPT based liquefaction evaluation methods", Innovations Applications in Geotechnical Site Characterization ,P. Mayne and R. Hryciw (eds.), Geotechnical Special Publication, No. 97, ASCE, New York, pp. 49-64 (2000).