

بررسی پارامترهای مؤثر در روانگرایی خاک‌های ماسه‌یی سُست با استفاده از روش مربع لاتین بهبودیافته

سعید گلمغانی ابراهیمی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

علی نورزاد* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

حسین جواهری کوپائی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

وقوع پدیده‌ی روانگرایی در خاک‌های سُست ماسه‌یی در شرایط اشباع تحت بارهای لرزه‌یی موجب می‌شود ذرات خاک تمایل به کاهش حجم داشته باشند. به‌طوری که در صورت عدم امکان زهکشی، فشار آب حفره‌یی درون خاک افزایش می‌یابد و در شرایط تنش ثابت، تنش مؤثر بین ذرات به صفر نزدیک می‌شود. در چنین حالتی ذرات خاک هیچ‌گونه مقاومت برشی ندارد و حالت روانگرایی رخ می‌دهد. در پژوهش حاضر، تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها با استفاده از آخرین اصلاحات ارائه‌شده توسط ادریس و بولانژه (۲۰۱۴) برای روش ساده‌شده و با به‌کارگیری روش مربع لاتین بهبودیافته (IHS) انجام شده است. مقایسه‌ی نتایج روش IHS با شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان داد که روش پیشنهادی برای تحلیل روانگرایی قابل اعتماد است. تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی محدوده‌ی وسیعی از خاک‌های روانگرا و غیرروانگرا بر مبنای ضرایب تغییرات پارامترها نشان داد که تغییرپذیری پارامترهای خاک و بارگذاری زلزله می‌تواند تأثیر مهمی در احتمال روانگرایی داشته باشد.

واژگان کلیدی: روانگرایی، عدم قطعیت، خاک سُست ماسه‌یی، تحلیل قابلیت اعتماد، نمونه‌گیری مربع لاتین بهبودیافته (IHS).

۱. مقدمه

و از ضریب اطمینان (F_s) در برابر روانگرایی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک استفاده می‌کند.

از آنجایی که در روش‌های قطعی، عدم قطعیت پارامترها لحاظ نمی‌شوند و با توجه به ماهیت احتمالاتی بارگذاری زلزله و عدم قطعیت‌های ذاتی و شناختی پارامترهای خاک، پژوهشگران مختلف از روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مقاومتی خاک و بارگذاری زلزله در ارزیابی قابلیت روانگرایی خاک استفاده کرده‌اند. در حالت کلی، روش‌های قابلیت اعتماد به دو گروه تقریبی و شبیه‌سازی تقسیم می‌شوند. از کارهای انجام‌یافته به روش تقریبی، می‌توان به استفاده از روش لنگر دوم مرتبه‌ی اول^۱ (FOSM)، روش قابلیت اعتماد مرتبه‌ی اول^۲ (FORM) و روش لنگر دوم مرتبه‌ی اول پیشرفته^۴ (AFOSM)^{۱۳}، در تعیین پتانسیل روانگرایی خاک اشاره کرد. اغلب کارهای صورت‌گرفته به روش شبیه‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو^{۱۴-۱۶} انجام شده است، هر

روانگرایی یکی از علل مهم خرابی سازه‌هاست. از زمان وقوع زلزله‌های نینگاتا و آلاسکا (۱۹۶۴) تا زلزله‌های سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌یی در خصوص روانگرایی در سراسر جهان انجام شده است. در ایران نیز پدیده‌ی روانگرایی در نقاط مختلف مشاهده شده است، که در این خصوص می‌توان به مشاهده‌های موجود در زلزله‌های رودبار (۱۹۹۰) و بوشهر (۲۰۱۳) اشاره کرد.

روابط مختلفی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک وجود دارند؛ که عموماً براساس یکی از سه روش: مبتنی بر تنش تناوبی^{۱۱}، کرنش تناوبی^{۱۲} و روش انرژي^{۱۳} توسعه داده شده‌اند. سید و ادریس^۱ (۱۹۷۱)، روشی را مبتنی بر نتایج آزمایش SPT برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک ارائه کرده‌اند، که به روش ساده‌شده معروف است. روش اخیر، مورد تأیید آیین‌نامه‌های مختلف نیز قرار گرفته و مطالعات زیادی مبتنی بر آن انجام شده است.^{۴-۱۱} روش ساده‌شده، قطعی است

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳.

استناد به این مقاله:

گلمغانی ابراهیمی، سعید، نورزاد، علی، و جواهری کوپائی، حسین، ۱۴۰۳. بررسی پارامترهای مؤثر در روانگرایی خاک‌های ماسه‌یی سُست با استفاده از روش

مربع لاتین بهبودیافته، مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)، صص. ۹۳-۱۰۴. DOI: 10.24200/j30.2024.63178.3260

^۱Seed & Idriss^۲First Order Reliability Method^۳First-Order Second-Moment^۴Advanced First Order Second Moment

جدول ۱. مشخصات موارد تاریخچه‌ی منتخب برای انجام تحلیل‌های مقدماتی.

مورد	M	Amax/g	Avg. depth (m)	σ_v (kPa)	$\sigma_{v'}$ (kPa)	Avg. N_{spt}	FC (%)	Liq. ?
۱	۵/۹	۰/۲۶	۴/۶	۸۷	۵۴	۷/۱	۳۰	Yes
۲	۶/۶۹	۰/۸۴	۸/۵	۱۵۶	۱۴۳	۱۳/۶	۵۰	Yes
۳	۸/۳	۰/۲	۴	۷۵	۴۵	۵	۲۰	Yes
۴	۷/۶	۰/۱۸	۱۰/۱	۱۹۰	۱۰۹	۲۰	۲	No
۵	۷/۷	۰/۰۵۲	۴/۳۹۵	۸۱	۵۴	۲/۶	۶۶	No
۶	۶/۹۳	۰/۳۹	۷	۱۳۰	۱۰۸	۲۰	۱۳	Yes

IHS برای تحلیل حساسیت روانگرایی خاک‌ها استفاده نشده و تحلیل حساسیت انجام شده در مطالعات پیشین با روش‌های دیگر بر روی دامنه‌ی محدودی از خاک‌های عمدتاً روانگرا انجام شده است (که همین مورد در نتایج آن‌ها تأثیر گذاشته است). باعث شده است پژوهشگران مختلف نتایج متناقضی در خصوص تأثیر پارامترهای مشخص گزارش کنند.^{[۱۶]، [۲۶]} در پژوهش حاضر، تحلیل حساسیت با استفاده از روش IHS و براساس ضریب تغییرات (COV)^۲ برای تعیین تأثیر پارامترهای مختلف در احتمال روان‌گرایی و نیز تحلیل حساسیت بر روی طیف وسیعی از موارد روانگرا و غیرروانگرا انجام و ملاحظه شد که استفاده از یک محدوده‌ی خاص و محدود از پارامترها می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد و در نتیجه‌های به‌دست‌آمده، اختلاف‌هایی مشاهده شود.

۲. مشخصات ژئوتکنیکی و لایه‌بندی خاک‌های مطالعه‌شده

به‌منظور ارزیابی نتایج و کاربرد روش‌های قطعی و قابلیت اعتماد ارزیابی روانگرایی، اطلاعات ژئوتکنیکی شش گم‌لنه، که توسط بولانژه و ادريس^۳ (۲۰۱۴) مطابق جدول ۱ ارائه شده است،^[۱۸] استفاده شده است. این موارد تاریخچه‌ی به نحوی انتخاب شده‌اند که هم در برگیرنده‌ی موارد روانگرا و هم غیرروانگرا هستند و هم محدوده‌ی نسبتاً وسیعی از هر پارامتر مؤثر در روانگرایی را شامل می‌شوند. در شکل ۱، مشخصات خاک استفاده‌شده در تحلیل حساسیت مشاهده می‌شود.

برای انجام تحلیل حساسیت، مشخصات یک گمانه که تحت تأثیر زلزله‌ی نیگاتا^۴ (۱۹۶۴، ۱۶ ژوئن) در محل کاواگیشی-چو^۵ قرار گرفته و توسط بولانژه و ادريس (۲۰۱۰) گزارش شده است، انتخاب شده است. زلزله‌ی تجربه‌شده توسط گمانه‌ی اخیر، دارای $M=۷/۶$ و $a_{max}=۰/۱۶۲g$ بوده است.

۳. تحلیل موارد تاریخچه‌ی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی

روانگرایی خاک با استفاده از یک روش قطعی مبتنی بر آزمایش SPT و قابلیت اعتماد توسط شبیه‌سازی‌های MC و IHS ارزیابی شده است.

چند شبیه‌سازی مونت کارلو به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی چندان محبوب نیست،^[۱۴] و بیشتر به عنوان معیاری برای ارزیابی سایر روش‌ها استفاده می‌شود. اخیراً روش‌های آماری، که از نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده استفاده می‌کنند و در انتخاب نقاط نمونه، رفتاری هوشمندانه‌تر دارند، بیشتر از روش‌های سعی و خطایی مانند مونت کارلو استفاده می‌کنند. یکی از روش‌های مذکور، روش نمونه‌گیری مربع لاتین بهبودیافته (IHS)^۱ است،^[۱۷] که مطالعات لندکی در استفاده از آن برای تحلیل روانگرایی انجام شده،^[۸] و تاکنون از آن برای تحلیل حساسیت روانگرایی خاک استفاده نشده است.

در روش IHS، پس از ایجاد نمونه‌های تصادفی، نمونه‌ها دسته‌بندی می‌شوند و از هر دسته یک نمونه انتخاب می‌شود. این کار باعث کاهش تعداد نمونه‌ها می‌شود. نمونه‌ی معرف هر دسته به گونه‌ی انتخاب می‌شود که فاصله‌ی بهینه با سایر نقاط دسته داشته باشد. روش IHS شامل تمام مزایای انتخاب نمونه‌ی تصادفی است و نسبت به روش شبیه‌سازی مونت کارلو، سهولت محاسباتی و سرعت عمل بیشتری دارد. بنابراین، در مورد استفاده از روش‌های نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده در مطالعات تحلیل قابلیت اطمینان روان‌گرایی، آگاهی کافی وجود ندارد.

در نوشتار حاضر، ابتدا امکان‌سنجی تحلیل روانگرایی با استفاده از روش IHS بررسی شده است. برای این منظور، با انتخاب پارامترهای خاک و متغیرهای حرکت تصادفی زمین‌لرزه، احتمال روانگرایی برای شش حالت موردی با استفاده از روش IHS به‌دست آمده و مراحل محاسبه شرح داده شده است. از آنجایی که شبیه‌سازی مونت کارلو (MC) در اغلب منابع به‌عنوان روش معیار در ارزیابی احتمال روانگرایی استفاده شده است؛ لذا در مطالعه‌ی حاضر، احتمال روانگرایی خاک با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی MC و IHS محاسبه و نتایج آن‌ها مقایسه شده است. سپس بر روی دقت روش IHS بحث صورت گرفته و مشخص شده است که روش IHS، یک رویکرد جدید برای تحلیل قابلیت اطمینان روانگرایی خاک است، که می‌تولند زمان و هزینه‌ی محاسباتی را به میزان چشمگیری کاهش دهد. از آنجایی که تاکنون از روش

^۴ Niigata

^۵ Kawagishi-Cho

^۱ Improved distributed Hypercube Sampling

^۲ Coefficient Of Variation

^۳ Boulanger & Idriss

صورت مبنا ارائه شده و برای سایر مقادیر M و σ'_v با استفاده از روابط ۵ الی ۱۵ اصلاح می‌شود:

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7/5, \sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (5)$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left[\lambda / 64 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1 / 325 \right] \quad (6)$$

$$MSF_{max} = 1 / 0.9 + \left(\frac{(N_1)_{\phi, cs}}{31/5} \right)^r \leq 2 / 2 \quad (7)$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1 / 1 \quad (8)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18/9 - 2/55 \sqrt{(N_1)_{\phi, cs}}} \leq 0 / 3 \quad (9)$$

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1 / 7 \quad (10)$$

$$m = 0.784 - 0.076 \lambda \sqrt{(N_1)_{\phi, cs}} \quad (11)$$

$$(N_1)_{\phi, cs} = C_N C_E C_R C_B C_S N_m \quad (12)$$

$$(N_1)_{\phi, cs} = (N_1)_{\phi, cs} + \Delta(N_1)_{\phi, cs} \quad (13)$$

$$\Delta(N_1)_{\phi, cs} = \exp\left[1/63 + \frac{9/7}{FC + 0/01} - \left(\frac{15/7}{FC + 0/01} \right)^r \right] \quad (14)$$

$$CRR_{M=7/5, \sigma'_v=1} = \exp\left[\frac{(N_1)_{\phi, cs}}{14/1} + \left(\frac{(N_1)_{\phi, cs}}{126} \right)^r - \left(\frac{(N_1)_{\phi, cs}}{23/6} \right)^r + \left(\frac{(N_1)_{\phi, cs}}{25/4} \right)^r - 2/8 \right] \quad (15)$$

در روابط اخیر، P_a فشار اتمسفر و FC محتوای ریزدانه‌ی خاک، C_N ضریب اصلاح سربار، C_E ضریب اصلاح انرژی، C_R ضریب اصلاح طول، C_B یک ضریب تصحیح برای قطرهای غیراستاندارد گمانه، C_S ضریب اصلاح برای استفاده از نمونه‌گیر دو کفه‌یی، و N_m تعداد ضربه‌های اندازه‌گیری‌شده در آزمایش SPT هستند.

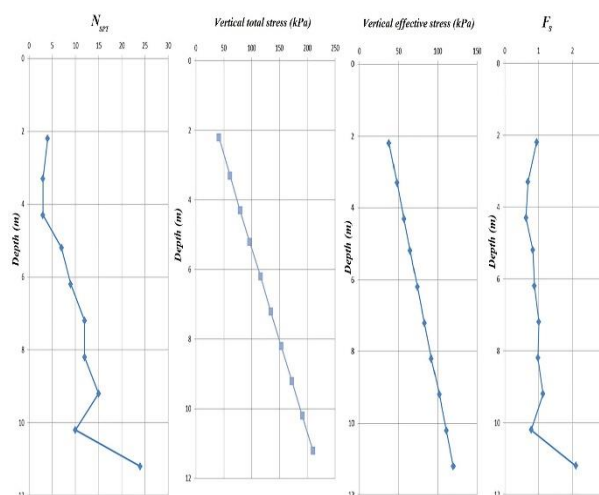
ضریب اطمینان در برابر روانگرایی (F_s) از رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید:

$$F_s = \frac{CRR_{M, \sigma'_v}}{CSR_{M, \sigma'_v}} \quad (16)$$

اگر $F_s \leq 1$ ، خاک روانگرا می‌شود و در صورتی که $F_s > 1$ ، روانگرایی اتفاق نخواهد افتاد.

۲.۳. ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش قابلیت اعتماد

برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد لازم است این مراحل انجام شود:



شکل ۱. مشخصات خاک گمانه‌ی بررسی‌شده در تحلیل حساسیت.

همچنین برای تحلیل حساسیت از روش تحلیل قابلیت اعتماد به روش IHS استفاده شده است.

۱.۳. ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش قطعی

روش مبتنی بر آزمایش SPT برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی که اولین بار توسط سید و ادیس (۱۹۷۱) توسعه یافته است، طی ده‌ها سال به‌عنوان روش استاندارد در سراسر دنیا استفاده شده است. [۷] آخرین بروزرسانی در روابط مبتنی بر آزمایش SPT توسط ادیس و بولانژه (۲۰۱۴) انجام شده است. [۱۸] برای ارزیابی روانگرایی، نسبت تنش تناوبی (CSR) در عمق دلخواه Z اغلب به‌صورت مقدار معرف معادل 0.65 نسبت تنش برشی تناوبی بیان می‌شود، که به‌صورت رابطه‌ی ۱ پیشنهاد شده است:

$$CSR_{M, \sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (1)$$

که در آن، σ'_v تنش کل قائم (بر حسب کیلوپاسکال) در عمق Z (بر حسب متر)، σ'_v تنش مؤثر قائم (بر حسب کیلوپاسکال)، $\frac{a_{max}}{g}$ بیشینه‌ی شتاب افقی (به‌صورت نسبتی از شتاب ثقل) در سطح زمین، و r_d ضریب کاهش تنش برشی به‌منظور لحاظ کردن پاسخ دینامیکی پروفیل خاک هستند. در رابطه‌ی اخیر، r_d به‌صورت رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود:

$$r_d = \exp\left[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M \right] \quad (2)$$

که در آن، $\alpha(z)$ و $\beta(z)$ مطابق روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$\alpha(z) = -1/0.12 - 1/126 \sin\left(\frac{z}{11/73} + 5/133 \right) \quad (3)$$

$$\beta(z) = 0/106 + 0/118 \sin\left(\frac{z}{11/28} + 5/142 \right) \quad (4)$$

که در آن‌ها، Z عمق خاک به متر و عبارت داخل \sin به رادیان هستند. نسبت مقاومت تناوبی (CSR) ظرفیت خاک برای مقاومت در برابر روانگرایی را بیان می‌کند. رابطه‌ی CSR برای مقادیر $M=7/5$ و $\sigma'_v=1 \text{ atm}$ به

جدول ۲. محدوده‌ی ضرایب تغییرات متعارف برای متغیرهای تصادفی ورودی.^[۲۰]

متغیر تصادفی	محدوده‌ی متعارف برای COV
$N_{\sqrt{6}}$	۰/۰-۱/۴
FC	۰/۰-۰۵/۳۵
σ'_v	۰/۰-۰۵/۲
σ_v	۰/۰-۰۵/۲
a_{max}	۰/۰-۱/۲
M	۰/۰-۰۵/۱

جدول ۳. ضرایب همبستگی بین ۶ متغیر تصادفی ورودی.^[۲۰]

متغیر	$N_{\sqrt{6}}$	FC	σ'_v	σ_v	a_{max}	M
$N_{\sqrt{6}}$	۱	۰	۰/۳	۰/۳	۰	۰
FC	۰	۱	۰	۰	۰	۰
σ'_v	۰/۳	۰	۱	۰/۹	۰	۰
σ_v	۰/۳	۰	۰/۹	۱	۰	۰
a_{max}	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹
M	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۱

جدول ۴. مشخصات استفاده‌شده برای متغیرهای تصادفی.

متغیر	$N_{\sqrt{6}}$	FC	σ'_v	σ_v	a_{max}	M
COV	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۵	۰/۰۷۵

ضریب همبستگی استفاده شده‌اند.

با توجه به موارد اشاره‌شده در تحلیل‌های انجام‌یافته در بخش‌های بعد، ابتدا ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی انتخابی مطابق مقادیر درج‌شده در جدول ۴ قرار گرفته و سپس در زمان انجام تحلیل حساسیت از محدوده‌ی ارائه‌شده در جدول ۱ استفاده شده است.

۳.۳. شبیه‌سازی مونت کارلو (MC)

شبیه‌سازی مونت کارلو، یک الگوریتم محاسباتی است که برای محاسبه‌ی نتایج از نمونه‌گیری تصادفی تکرار شونده استفاده می‌کند. در شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین کمی عدم قطعیت‌های مدل، برای هر یک از متغیرهای تصادفی ورودی، یک تابع توزیع احتمال در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که متغیرهای ورودی مدل به‌صورت غیرقطعی توصیف شوند،

الف) تعیین تابع حالت حدی؛

ب) تعریف میانگین و انحراف معیار هر پارامتر خاک؛

ج) محاسبه‌ی ماتریس همبستگی برای پارامترهای خاک؛

د) محاسبه‌ی احتمال روانگرایی.

تحلیل قابلیت اعتماد همواره با فرموله کردن تابع حالت حدی مسئله‌ی مورد مطالعه شروع می‌شود. در مورد روانگرایی، تابع حالت حدی یا تابع عملکرد تابعی است که منطقه‌ی روانگرا را از منطقه‌ی غیر روانگرا جدا می‌کند و به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ بیان می‌شود:

$$G(X) = CRR - CSR = \cdot \quad (17)$$

به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سازنده‌ی CRR و CSR، پارامترهای اخیر با متغیرهای تصادفی تعریف می‌شوند. برای محاسبه‌ی CSR دو متغیر تصادفی، تعداد ضربه‌های آزمایش نفوذ استاندارد (N_{spt}) و محتوای ریزدانه (FC) و برای محاسبه‌ی CSR، چهار متغیر تصادفی σ'_v ، M ، a_{max} و σ_v ، و بررسی شده‌اند.

بنابراین، $G(X)$ تابعی از ۶ متغیر تصادفی است، که به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ بیان می‌شود:

$$G(X) = CRR - CSR = G(N_{spt}, FC, a_{max}, M, \sigma'_v, \sigma_v) \quad (18)$$

احتمال روانگرایی با انتگرال گیری از رابطه‌ی اخیر به‌صورت رابطه‌ی ۱۹ تعریف می‌شود:

$$P_f = P(g(X) \leq \cdot) = \int_{g(X) \leq \cdot} f_X(X) dX \quad (19)$$

که در آن، $f_X(X)$ تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی است. پس از تعریف تابع عملکرد، عدم قطعیت پارامترهای موجود در رابطه با استفاده از تابع توزیع احتمال و انحراف معیار هر متغیر تصادفی تعیین می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که هر ۶ متغیر تصادفی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند.

برای محاسبه‌ی انحراف معیار متغیرهای تصادفی، چهار روش که می‌توان از آن‌ها در شرایط مختلف استفاده کرد، عبارت‌اند از: محاسبه از روی داده‌های موجود، مقادیر منتشرشده، قانون سه سیگما، و قانون سه سیگمای ترسیم‌ی.^[۱۹] در پژوهش حاضر، انحراف معیار با استفاده از مقادیر منتشرشده برای ضریب تغییرات و مطابق رابطه‌ی ۲۰ محاسبه شده است:

$$\sigma = (COV)(\bar{x}) \quad (20)$$

که در آن، σ انحراف معیار^۱، ضریب کواریانس (COV) تغییرات، و \bar{x} مقدار میانگین هستند.

فون^۲ (۲۰۰۸، ۲۰۱۰) کارهای انجام‌یافته‌ی قبلی پژوهشگران مختلف را جمع‌بندی و ارزیابی کرد. همچنین جدول ۲ را برای تعیین ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی و جدول ۳ را برای ضرایب همبستگی بین متغیرهای تصادفی ارائه کرد، که در پژوهش حاضر برای انتخاب محدوده‌ی COV و

^۲ Phoon

^۱ Standard deviation

را داشته باشند، استفاده می‌کنند و در آن‌ها قبل از اینکه تحلیل انجام شود، تلاش بیشتری برای انتخاب نقاط نمونه انجام می‌گیرد تا آن‌ها بتوانند متغیرهای طراحی موردنظر را در تمام فضای طراحی پوشش دهند. یکی از روش‌های مذکور، روش نمونه‌گیری مربع لاتین بهبودیافته^۱ است، که به اختصار IHS نامیده می‌شود.^[۲۱] نمونه‌گیری IHS، از نمونه‌گیری بسیار ساختاریافته‌بی استفاده می‌کند، در حالی که طبیعت اتفاقی اولیه‌ی سیستم برای برآورد خطا را نیز حفظ می‌کند.

در روش IHS، کلیه‌ی نقاط تصادفی تولیدشده به سبدهایی تقسیم می‌شوند. از هر سبد، نقاطی به‌عنوان نماینده انتخاب می‌شوند که فاصله‌ی آن‌ها از سایر نقاط انتخابی برابر یک مقدار بهینه باشد. این فاصله‌ی بهینه توسط رابطه‌ی ۲۲ تا ۲۴ تعیین می‌شود، که در آن n تعداد سبدها و m تعداد ابعاد است. در این روش پس از ایجاد نقاط تصادفی، فاصله‌ی هر نقطه با تمام نقاط دیگر مقایسه می‌شود و نقطه‌ی که مجموعه‌ی مطلوب را ایجاد می‌کند، از تمام نقاط ممکن انتخاب می‌شود. این پروسه تا زمانی که مجموعه‌ی کل نمونه انتخاب شوند، تکرار می‌شود.

$$n^m = \text{حجم} \quad (22)$$

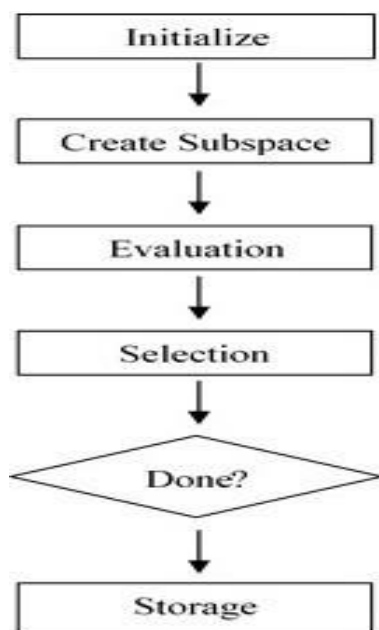
$$\frac{n^m}{n} = \frac{\text{حجم}}{\text{نقطه}} \quad (23)$$

$$d_{opt} = \frac{n}{\sqrt{m}} \quad (24)$$

الگوریتم انتخاب نقاط نمونه در روش IHS در شکل ۲ مشاهده می‌شود:

انجام محاسبات به روش IHS، این گام‌ها را دارد:

۱- برای هر کدام از متغیرهای تصادفی ورودی، تعدادی نقاط تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت بین ۰ و ۱ تولید می‌شوند.



شکل ۲. الگوریتم انتخاب نقاط نمونه در روش IHS.

خروجی‌های مدل نیز لزوماً غیرقطعی خواهند بود و به یک جواب واحد ختم نمی‌شوند. در روش مونت کارلو برای هر پارامتر ورودی تصادفی با توجه به شکل تابع چگالی احتمال آن و دامنه‌ی تغییراتش، اعداد تصادفی ایجاد می‌شود. اعداد تصادفی ساخته‌شده، در تابع عملکرد قرار داده می‌شوند و این فرایند تا آنجا ادامه می‌یابد که به‌طور تقریبی تابع چگالی ضریب اطمینان تعیین و با توجه به آن، احتمال گسیختگی محاسبه می‌شود.

شبیه‌سازی مونت کارلو، چهار مرحله دارد: [۲۱ و ۲۲]

- برای هر کدام از متغیرهای تصادفی ورودی، یک مقدار تصادفی با توجه به تابع چگالی احتمال آن انتخاب می‌شود.
- مقدار ضریب اطمینان با استفاده از تابع عملکرد و با توجه به مقدار عددی انتخاب‌شده در مرحله‌ی اول محاسبه می‌شود.
- مراحل یک و دو به تعداد بسیار زیادی تکرار می‌شوند و مقدار ضریب اطمینان برای هر تکرار، تعیین می‌شود.
- با استفاده از مقادیر ضریب اطمینانی که از مراحل قبل به دست آمده‌اند، می‌توان احتمال وقوع شرایط نامناسب ($F_S < 1$)، مقدار میانگین، واریانس ضریب اطمینان، و شکل تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان را به‌دست آورد.

تعداد تکرار لازم در شبیه‌سازی مونت کارلو برای ساخت تابع توزیع احتمال تابع عملکرد به میزان سطح ایمنی، دقت مطلوب برای حل مسئله و همچنین تعداد متغیرهای تصادفی دخیل در مسئله بستگی دارد. تعداد تکرارهای لازم برای مسائل با متغیرهای تصادفی ورودی را می‌توان با رابطه‌ی ۲۱ تقریب زد: [۲۳ و ۲۴]

$$N = \left(\frac{d^r}{4(1-\varepsilon)^2} \right)^m \quad (21)$$

که در آن، N تعداد مراحل محاسباتی شبیه‌سازی مونت کارلو، d و ε به ترتیب انحراف معیار نرمال و سطح اطمینان مطلوب، و m تعداد متغیرهای تصادفی ورودی هستند.

۴.۳. روش نمونه‌گیری مربع لاتین بهبودیافته

همان‌طور که گفته شد، شبیه‌سازی مونت کارلو از توالی مختلف اعداد تصادفی با تعداد زیادی مراحل محاسباتی، برای حل مسئله استفاده می‌کند. از طرفی، با توجه به رابطه‌ی ارائه‌شده برای تعداد تکرارهای لازم در حل مسائل با شبیه‌سازی مونت کارلو، هنگامی که ابعاد مسئله اضافه می‌شود، محاسبات به طرز ناامیدکننده‌یی افزایش پیدا می‌کنند، به نحوی که مسئله بسیار بزرگ‌تر از آن می‌شود که بتوان آن را حل کرد.

اخیراً به جای استفاده از روش‌های سعی و خطایی، مانند شبیه‌سازی مونت کارلو، به روش‌های احتمالاتی برای نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده توجه شده است، تا محل‌های نمونه هوشمندانه‌تر انتخاب شوند. روش‌های نمونه‌گیری طبقه‌بندی‌شده، بهبودیافته‌ی روش‌های نمونه‌گیری تصادفی هستند. این روش‌ها از یک طرح برای انتخاب نقاطی که بهترین پوشش فضا

^۱ Improved Hypercube Sampling

جدول ۵. احتمال روانگرایی موارد تاریخچه‌یی منتخب حاصل از شبیه‌سازی MC و IHS.

MC	تعداد نقاط نمونه در روش IHS					F_S	مورد
	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰		
۷۳/۷	۷۴/۰۷۵	۷۳/۲	۷۳/۳	۶۸	۸۰	۰/۸۰۶	۱
۹۸/۹	۹۹/۰۵	۹۸/۷۵	۹۹/۳	۱۰۰	۱۰۰	۰/۳۸۴	۲
۹۶/۸	۹۷/۰۵	۹۶/۹	۹۷/۲	۹۶	۱۰۰	۰/۶۴۴	۳
۲۴/۶	۲۴/۶۷۵	۲۴/۶۵	۲۴/۴	۲۹	۲۰	۱/۳۸۵	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۴۹۳	۵
۴۶/۳	۴۶	۴۶/۱	۴۵/۸	۴۹	۴۰	۱/۰۱۴	۶

خروجی تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی به روش IHS، موارد مندرج در جدول ۱ با استفاده از ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، و ۴۰۰۰ نقطه‌ی نمونه، تحلیل و احتمال روانگرایی در هر مورد به‌دست آمده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی MC و IHS برای موارد تاریخچه‌یی منتخب در جدول ۵ ارائه شده است؛ که مطابق آن، نتایج حاصل از فقط ۱۰ نقطه‌ی نمونه، روش IHS نیز توافق خوبی با نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱/۲ میلیون نقطه‌ی ارزیابی داشته است؛ به نحوی که در بیشترین حالت، اختلافی کمتر از ۰/۷٪ بین نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو و IHS با ۱۰ نقطه‌ی نمونه وجود داشته و با افزایش تعداد نقاط نمونه در روش IHS اختلاف نتایج کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که در تمام ۶ مورد تاریخچه‌یی نشان داده‌شده، نتایج حاصل از ۲۰۰۰ نقطه‌ی نمونه‌ی روش IHS اختلافی کمتر از ۰/۵٪ با نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو (با ۱/۲ میلیون نقطه‌ی ارزیابی) دارند. این امر می‌تواند نشانگر کارایی بالای روش IHS در تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی باشد.

با مقایسه‌ی ضرایب اطمینان محاسبه‌شده برای ۶ مورد موجود در جدول ۱ با احتمال روانگرایی محاسبه‌شده در جدول ۵ مشخص می‌شود مواردی که در آن‌ها احتمال روانگرایی کمتر از ۰/۲۵٪ به‌دست آمده است، روانگرا نشده و مواردی که احتمال روانگرایی در آن‌ها بزرگ بوده است، روانگرا شده‌اند. در حالی که برای مورد ششم، علی‌رغم اینکه ضریب اطمینان بیش از ۱ محاسبه شده است، روانگرایی اتفاق افتاده است. لذا می‌توان گفت به‌دست آمدن ضریب اطمینان بزرگ‌تر از ۱ در روش قطعی، تضمین‌کننده‌ی عدم وقوع روانگرایی نیست.

از آنجایی که برای مورد ششم در جدول ۵، احتمال روانگرایی حدود ۰/۵٪ به‌دست آمده است، با استفاده از طبقه‌بندی جوانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۰)، [۲۵] می‌توان این قضاوت را داشت که وقوع و عدم وقوع روانگرایی در چنین خاکی محتمل است؛ لذا با توجه به اهمیت سازه‌یی که بر روی خاک مذکور قرار خواهد گرفت، می‌توان در مورد صرف هزینه‌ی بیشتر برای اجتناب از روانگرایی خاک تصمیم‌گیری منطقی کرد. همان‌طور که قبلاً ذکر شده است، روش قطعی برای مورد اخیر، ضریب اطمینان را بزرگ‌تر از ۱ محاسبه و خاک را غیرروانگرا طبقه‌بندی می‌کند. بنابراین می‌توان گفت روش قابلیت اعتماد،

۲- از بین نقاط تولیدشده برای هر متغیر تصادفی، تعداد نقاط موردنیاز انتخاب می‌شود. این انتخاب به نحوی است که هر نقطه‌ی انتخاب‌شده، فاصله‌ی بهینه از سایر نقاط تولیدشده داشته باشد.

۳- تابع چگالی احتمال موردنظر برای هر متغیر تصادفی به نقاط انتخاب‌شده مربوط به آن متغیر تصادفی اعمال می‌شود.

۴- مقدار ضریب اطمینان با استفاده از تابع عملکرد و با توجه به مقدار عددی انتخاب‌شده در مرحله‌ی قبل محاسبه می‌شود.

۵- مرحله‌ی ۴ به تعداد نقاط انتخاب‌شده برای هر پارامتر تکرار و مقدار ضریب اطمینان برای هر تکرار، محاسبه می‌شود.

۶- با استفاده از مقادیر ضریب اطمینانی، که از مراحل قبل به دست آمده است، می‌توان احتمال وقوع شرایط نامناسب ($F_s < 1$) را محاسبه کرد.

۵.۲. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی با استفاده از شبیه‌سازی MC و IHS

از آنجایی که شبیه‌سازی MC در مطالعات متعددی برای تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی استفاده شده است، برای بررسی کارایی روش IHS در تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی، شش مورد تاریخچه‌یی با مشخصات مندرج در جدول ۱ با استفاده از شبیه‌سازی MC و روش IHS تحلیل و احتمال روانگرایی محاسبه شده است.

برای انجام تحلیل‌ها با استفاده از شبیه‌سازی MC، ابتدا تعداد تکرارهای لازم در شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از رابطه‌ی ۲۱ و به‌صورت رابطه‌ی ۲۵ تعیین شده است:

$$N = \left(\frac{d^t}{4(1-\varepsilon)^t} \right)^m = \left(\frac{1/28^t}{4(1-0/8)^t} \right)^6 = 1,152,922 \quad (25)$$

در جهت اطمینان، تعداد تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو برابر ۱/۲ میلیون تکرار در نظر گرفته شده است. برای بررسی تأثیر تعداد نقاط نمونه در

^۱ Juang

ابزار مناسب‌تری برای قضاوت مهندسی در خصوص روانگرایی در اختیار متخصصان ژئوتکنیک قرار می‌دهد.

۴. تحلیل حساسیت

در بخش حاضر، برای تعیین تأثیر ضرایب تغییرات (COV) هر متغیر تصادفی بر روی پاسخ خاک، تحلیل حساسیت انجام شده است. برای این کار، COV هر متغیر با ثابت نگه‌داشتن تمام مشخصات سایر پارامترها، در چند پله افزایش داده شده است. این افزایش در COV به نحوی انتخاب شده است که برای هر متغیر تصادفی، کل محدوده‌ی ضرایب تغییرات درج‌شده در جدول ۱ را شامل شود.

برای انجام تحلیل حساسیت، گمانه‌ی با مشخصات ذکر شده در شکل ۱ انتخاب شده است. در کل، عمق گمانه‌ی مذکور خاک، ۵٪ محتوای ریزدانه (FC) داشته است و مطابق شکل ۱، ضریب اطمینان در برابر روانگرایی از حدود ۰/۶ تا ۲ در اعماق مختلف تغییر می‌کند. براساس روش قطعی خاک فقط در اعماق ۹/۲ و ۱۱/۲ متری، پدیده‌ی روانگرایی اتفاق خواهد افتاد.

تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی با استفاده از روش IHS برای گمانه‌ی ذکر شده انجام شد، که نتایج آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود. اگر طبقه‌بندی جوانگ و همکاران (۲۰۰۰) در نظر گرفته شود، برای مواردی که $PL \leq 85\%$ باشد، وقوع روانگرایی حتمی خواهد بود. در این صورت می‌توان گفت روانگرایی خاک گمانه در اعماق ۳/۳ و ۴/۳ متری اتفاق خواهد افتاد. مطابق شکل ۳ مشخص است که فقط در اعماق ۹/۲ و ۱۱/۲ متری، احتمال روانگرایی به میزان معناداری بیش از ۵۰٪ بوده است. همچنین احتمال روانگرایی در اعماق ۷/۲ و ۸/۲ متری، حدود ۵۰٪ بوده است. با دقت در مشخصات خاک گمانه در اعماق مختلف می‌توان دریافت در شرایطی که پارامترهای زلزله‌ی مؤثر در نمونه‌ی خاک ثابت باشد، تعداد ضربه‌های SPT تأثیر بسیار زیادی در احتمال روانگرایی دارد و در مواردی که تعداد ضربه‌های SPT بیشتر از ۱۲ است، احتمال روانگرایی به کمتر از ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

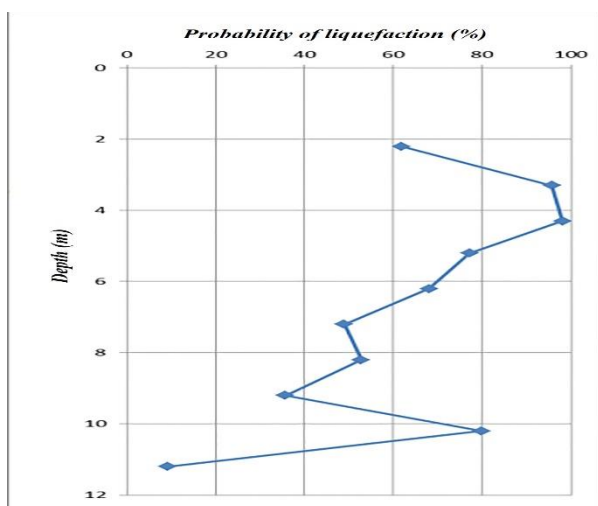
۱.۴ بررسی تأثیر ضریب تغییر تعداد ضربه‌های SPT در پاسخ خاک

برای بررسی تأثیر COV تعداد ضربه‌های SPT در پاسخ خاک، ضریب تغییرات عدد SPT برابر ۴ مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد انتخاب و با ثابت نگه‌داشتن سایر مشخصات پارامترهای خاک، تحلیل‌ها در هر عمق تکرار شده است. نتایج تحلیل‌ها در شکل ۴ نشان می‌دهد که افزایش COV عدد SPT از ۱۰٪ به ۴۰٪، باعث تغییر احتمال روانگرایی از ۰/۲٪ تا ۱۵/۳۸٪ شده است. افزایش COV عدد SPT در مواردی که PL کمتر از ۵۰٪ بوده است، باعث افزایش احتمال روانگرایی و در مواردی که PI بیشتر از ۵۰٪ بوده است، باعث کاهش احتمال روانگرایی شده است.

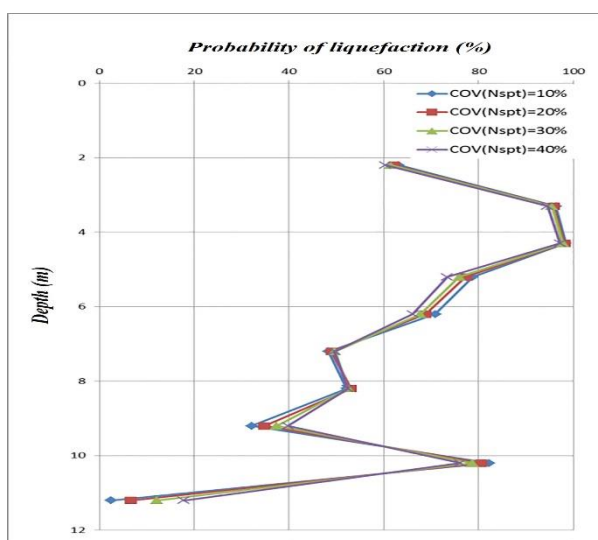
۲.۴ بررسی تأثیر ضریب تغییر FC در پاسخ خاک

برای بررسی تأثیر تغییر COV محتوای ریزدانه در نتایج خروجی از تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی، ضریب تغییرات FC برابر ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد انتخاب شده است.

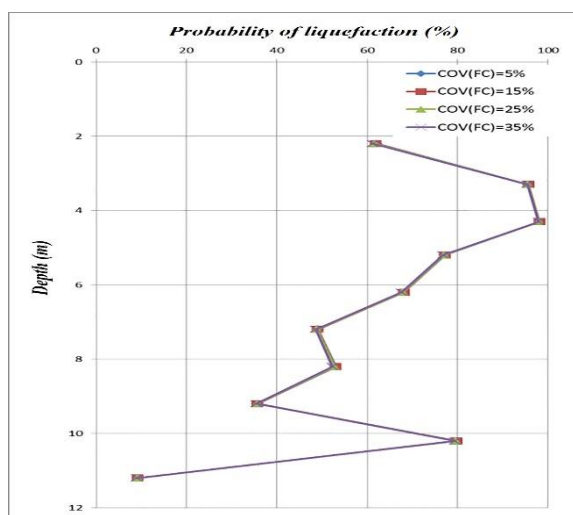
نتایج حاصل از تحلیل‌ها در شکل ۵ نشان می‌دهد که در مورد ذکر شده، تغییر احتمال روانگرایی به اندازه‌ی کم است که هر چهار نمودار تقریباً بر



شکل ۳. احتمال روانگرایی در اعماق مختلف.

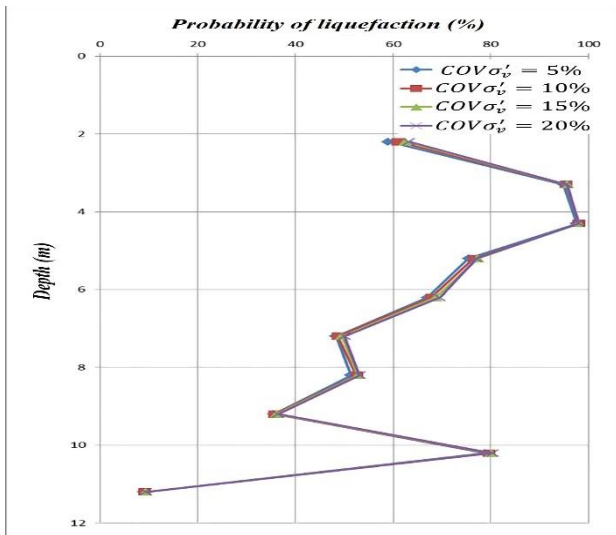


شکل ۴. تأثیر ضریب تغییر N_{spt} در احتمال روانگرایی.

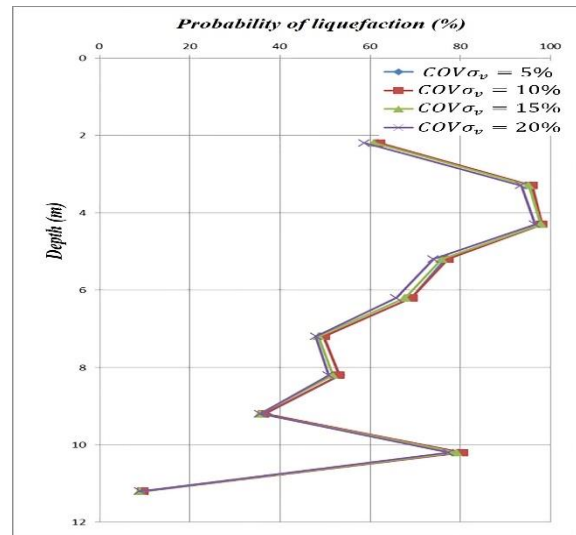


شکل ۵. تأثیر ضریب تغییر FC در احتمال روانگرایی.

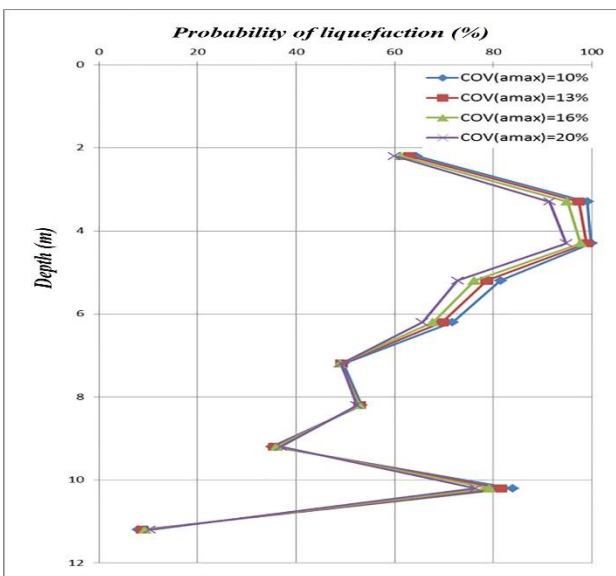
روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. لذا، افزایش ضریب تغییر محتوای ریزدانه (FC) در تمام موارد باعث کاهش احتمال روانگرایی شده است. با توجه به اینکه تغییر COV محتوای ریزدانه تأثیر بسیار کمی (کمتر از ۱٪) در احتمال



شکل ۷. تأثیر COV تنش مؤثر قائم خاک در احتمال روانگرایی.



شکل ۶. تأثیر COV تنش کل قائم خاک (σ_v) در احتمال روانگرایی.



شکل ۸. تأثیر ضریب تغییر بیشینه‌ی شتاب زلزله (a_{max}) در پاسخ خاک.

۱۵ و ۲۰ درصد برای COV تنش مؤثر قائم در نظر گرفته شدند و تحلیل‌ها صورت گرفت.

نتایج حاصل برای احتمال روانگرایی در گمانه‌ی بررسی‌شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش COV تنش قائم مؤثر از ۵٪ تا ۲۰٪ در تمام موارد باعث افزایش احتمال روانگرایی از ۴٪ تا ۲۸٪ شده است. با توجه به همبستگی بالای تنش کل و تنش مؤثر، موارد مطرح‌شده در خصوص تنش کل نیز در این مورد صادق است. تنها نکته‌ی قابل توجه در این مورد، تأثیر بیشتر ضریب تغییرات تنش مؤثر نسبت به تنش کل است، که نشانگر اهمیت بیشتر تنش مؤثر نسبت به تنش کل در احتمال روانگرایی خاک است؛ که علت آن وابستگی مستقیم پارامترهای مقاومتی خاک به تنش مؤثر وارد بر خاک است.

۵.۴. بررسی تأثیر ضریب تغییر a_{max} در پاسخ خاک

برای بررسی اثر تغییر COV بیشینه‌ی شتاب زلزله (a_{max}) در پاسخ خاک، مقادیر ۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۲۰ درصد برای ضریب تغییر بیشینه‌ی شتاب زلزله در نظر گرفته شد. در شکل ۸، نتایج احتمال روانگرایی حاصل از تحلیل‌ها نشان

روانگرایی داشته است، می‌توان در عمل از تأثیر پارامتر COV در احتمال روانگرایی صرف‌نظر کرد و فرض شود که احتمال روانگرایی با تغییر COV محتوای ریزدانه‌ی خاک تقریباً ثابت است و تغییر نمی‌کند. از آنجایی که درصد ریزدانه‌ی خاک در مقادیر حدود ۳۰٪ می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش پتانسیل روانگرایی داشته باشد، نتایج نشان می‌دهند تغییر COV در بازه‌ی متعارف خود عملاً نمی‌تواند درصد ریزدانه را از ۵٪ به حوالی ۳۰٪ برساند و بنابراین ضریب تغییرات درصد ریزدانه (FC)، کمترین تأثیر را در روانگرایی خاک خواهد داشت.

۳.۴. بررسی تأثیر ضریب تغییر σ_v در پاسخ خاک

برای بررسی تأثیر COV در تنش کل قائم در رفتار خاک (σ_v)، COV تنش کل برابر مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد انتخاب و تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی در کل گمانه انجام شده است. احتمال روانگرایی حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی در اثر تغییر COV تنش کل در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل ۶، افزایش ضریب تغییر تنش کل از ۵٪ به ۲۰٪، باعث تغییر احتمال روانگرایی از ۰/۹۷٪ تا ۲/۹۳٪ شده است. با دقت در شکل ۶ می‌توان دریافت که با افزایش عمق خاک، تأثیر تغییر COV تنش کل در روانگرایی خاک کاهش یافته است. از آنجایی که با افزایش عمق بر میزان تنش کل افزوده می‌شود، می‌توان گفت هر چه تنش کل خاک بزرگ‌تر باشد، تأثیر تغییر COV تنش کل در روانگرایی خاک کمتر خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهند که با بزرگ‌تر شدن مقدار تنش کل، تغییرات جزئی در مقادیر تنش کل ناشی از تغییر COV نمی‌تواند تأثیر معناداری در احتمال روانگرایی ایجاد کند. نتایج اخیر با گزارش‌های مختلف در خصوص روانگرانشدن انواع خاک‌های سُست ماسه‌یی در اعماق زیاد توافق کامل دارد. به عبارتی دیگر، با بزرگ‌تر شدن مقدار تنش کل وارد بر خاک، تأثیر تغییر مشخصات خاک کاهش می‌یابد.

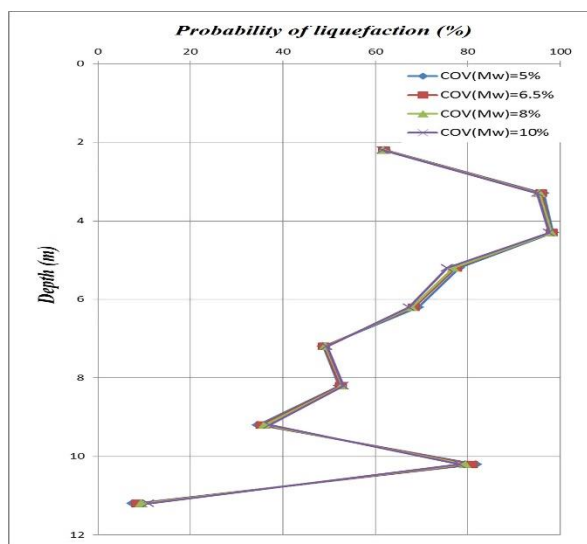
۴.۴. بررسی تأثیر ضریب تغییر σ'_v در پاسخ خاک

با توجه به اینکه محدوده‌ی COV ارائه‌شده برای تنش قائم مؤثر و تنش قائم کل در مراجع مختلف با یکدیگر برابر است، در این مورد نیز برای بررسی تأثیر تغییر COV تنش مؤثر قائم (σ'_v) در پاسخ خاک، چهار مقدار ۵، ۱۰،

COV بزرگای زلزله باعث کاهش احتمال روانگرایی محاسبه شده می شود. این امر می تواند بنا به دلایل ذکر شده در بخش ۵.۴ باشد. همچنین مطابق شکل ۹، بزرگای زلزله تأثیر کمتری نسبت به شتاب زلزله در روانگرایی خاک دارد. این امر به دلیل وابستگی بیشتر نسبت تنش تناوبی به شتاب زلزله است.

۷.۴. مقایسه‌ی تأثیر ضریب تغییر پارامترهای مختلف در احتمال روانگرایی

در جدول ۶، میزان اختلاف (قدرمطلق) نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام یافته با بیشترین و کمترین COV پارامترهای مختلف در هر عمق خاک ارائه شده است؛ که مطابق آن، در ۶ مورد $COV(a_{max})$ در دو مورد $COV(N_{spt})$ و در دو مورد $COV(\sigma_v)$ بیشترین تأثیر را در احتمال روانگرایی داشته‌اند. همچنین در ۸ مورد $COV(FC)$ ، در ۱ مورد $COV(M)$ و در ۱ مورد دیگر $COV(N_{spt})$ کمترین تأثیر را در نتایج داشته‌اند. از نظر مقدار تأثیر نیز بالاترین میزان تأثیر مربوط به تغییر $COV(N_{spt})$ با $15/83\%$ و کمترین میزان



شکل ۹. تأثیر ضریب تغییر بزرگای زلزله در پاسخ خاک.

می دهد که افزایش COV از 10% تا 20% ، باعث تغییر احتمال روانگرایی از 45% تا $75/8\%$ شده است. افزایش COV در عمق‌های $9/2$ و $11/2$ متری گمانه نیز باعث افزایش احتمال روانگرایی شده است.

با توجه به اینکه در اعماق $9/2$ و $11/2$ متری از گمانه، ضریب اطمینان محاسبه شده بالای ۱ و در سایر اعماق ضریب اطمینان کمتر از ۱ بوده است، می توان اذعان کرد در خصوص خاک‌هایی که ضریب اطمینان آن‌ها در برابر روانگرایی کمتر از ۱ بوده است، تغییرات $COV(a_{max})$ تأثیر بیشتری در نتایج دارد و افزایش پارامتر مذکور باعث کاهش احتمال روانگرایی محاسباتی می شود. همچنین مطابق شکل ۸، با افزایش عمق خاک، تأثیر $COV(a_{max})$ در احتمال روانگرایی کمتر شده است؛ که می تواند به دلیل افزایش تراکم خاک و افزایش تنش مؤثر باشد. به عبارت دیگر، در خصوص خاک‌های سست ماسه‌یی که آماده‌ی روانگرایی هستند، کوچک‌ترین تغییرات در شتاب زمین (که از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر زلزله است) می تواند باعث روانگرایی خاک شود؛ در حالی که در خاک‌هایی که عمق بیشتری دارند و تنش کل بالاتری را تحمل می کنند و همچنین خاک‌های دارای عدد SPT بالاتر، حساسیت کمتری نسبت به تغییر پارامتر شتاب زلزله دارند و تغییر پارامتر زمین لرزه، تأثیر کمتری در ایجاد روانگرایی خاک‌های ذکر شده خواهد داشت.

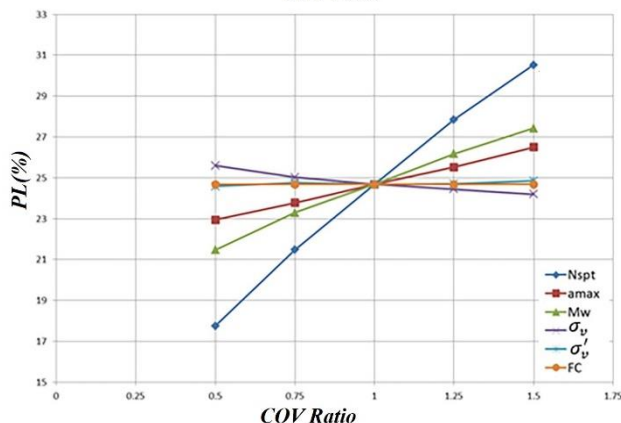
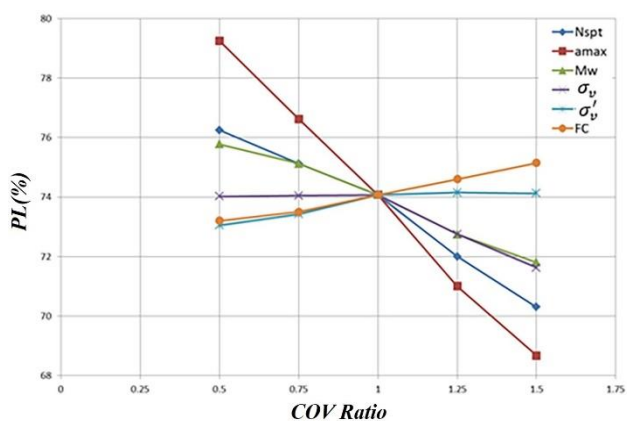
۶.۴. بررسی تأثیر ضریب تغییر بزرگای زلزله در پاسخ خاک

باتوجه به محدوده‌ی پیشنهادی برای ضریب تغییر بزرگای زلزله توسط سایر پژوهشگران، COV بزرگای زلزله برابر مقادیر ۵، $6/5$ ، ۸، و 10 درصد انتخاب و تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی انجام شد. نتایج تحلیل‌ها در شکل ۹ مشاهده می شود؛ که مطابق آن، افزایش ضریب تغییر از 5% تا 10% ، باعث تغییر احتمال روانگرایی از $53/0\%$ تا $65/3\%$ و افزایش COV بزرگای زلزله در عمق‌های $7/2$ ، $8/2$ ، $9/2$ و $11/2$ متری گمانه باعث افزایش احتمال روانگرایی شده است.

با توجه به اینکه در اعماق $9/2$ و $11/2$ متری، ضریب اطمینان خاک بیشتر از ۱ و در اعماق $8/2$ و $7/2$ متری ضریب اطمینان تقریباً برابر ۱ و در سایر اعماق بسیار کوچک‌تر از ۱ بوده است، می توان نتیجه گرفت که در خاک‌های دارای ضریب اطمینان کوچک‌تر از ۱ در برابر روانگرایی، COV بزرگای زلزله تأثیر بیشتری در احتمال روانگرایی دارد و در چنین خاک‌هایی، افزایش

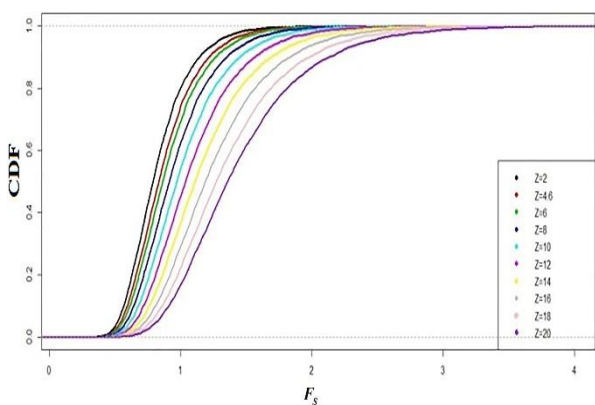
جدول ۶. میزان (درصد) اختلاف نتایج حاصل از بیشترین و کمترین ضرایب تغییر برای پارامترهای مختلف در هر عمق.

عمق (متر)	N_{SPT}	FC	σ_v	σ'_v	a_{max}	M
۲/۲	۲/۸۵	۰/۸	۲/۹۵	۴/۲۸	۴/۴۵	۰/۵۳
۳/۳	۱/۷۵	۰/۱	۲/۲	۰/۷۳	۷/۶۸	۱/۳۳
۴/۳	۱/۲	۰/۱	۱/۵۳	۰/۴	۵/۰۵	۰/۸۸
۵/۲	۵/۳۵	۰/۳۵	۲/۶۳	۱/۶۵	۸/۷۵	۲/۵۸
۶/۲	۴/۸	۰/۵	۳/۳۵	۲/۵	۶/۱۵	۱/۹۸
۷/۲	۱/۲۵	۰/۴۵	۱/۷۵	۱/۷۵	۰/۴۵	۰/۷۵
۸/۲	۰/۲	۰/۶۵	۲/۴	۱/۷۸	۰/۸۸	۰/۸
۹/۲	۷/۶۳	۰/۲۵	۱/۲	۰/۹	۱/۸۵	۲/۴۸
۱۰/۲	۶	۰/۳۵	۲/۳۳	۱/۴۸	۷/۴۵	۳/۶۵
۱۱/۲	۱۵/۳۸	۰/۱۸	۰/۹۸	۰/۴۵	۲/۱۸	۳/۲۷۵



شکل ۱۰. تغییر احتمال روانگرایی در اثر تغییر گام به گام COV پارامترهای ورودی:

(الف) برای مورد یک، و (ب) برای مورد چهار.



شکل ۱۱. اثر عمق در منحنی تابع توزیع تجمعی و ضریب اطمینان در برابر روانگرایی.

در جدول ۱ تغییر یافته و سایر موارد ثابت نگه داشته شده است. تحلیل‌ها برای اعماق ۲ تا ۲۰ متر نیز انجام شده است. در شکل ۱۱، تأثیر عمق در تابع توزیع تجمعی احتمال (CDF) ^۱ رسم شده برای خاک مورد یک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش عمق لایه، منحنی CDF به سمت راست انتقال یافته و ضریب اطمینان افزایش و در نتیجه احتمال روانگرایی کاهش یافته است. همچنین، در شکل ۱۲ تغییر احتمال روانگرایی با تغییر عمق

تأثیر مربوط به $COV(FC)$ با ۰/۱٪ بوده است. لذا می‌توان گفت بسته به شرایط مختلف ممکن است ضریب تغییر پارامترهای مختلف بیشترین تأثیر را در احتمال روانگرایی داشته باشند؛ به نحوی که پارامتری که در یک مورد بیشترین تأثیر را در روانگرایی داشته است، می‌تواند در شرایط دیگر کمترین تأثیر را در احتمال روانگرایی داشته باشد. این نتیجه از آنجایی حاصل می‌شود که محدوده‌ی نسبتاً وسیعی از احتمال روانگرایی در پژوهش حاضر بررسی شده است. استفاده از محدوده‌ی کوچکی از احتمال روانگرایی می‌تواند باعث ایجاد روندی نادرست در ارزیابی تحلیل‌ها شود و نتایج گمراه‌کننده‌ی را به همراه داشته باشد. به همین دلیل برخی از پژوهشگران نتایجی مغایر با یکدیگر گزارش کرده‌اند. [۱۶ و ۲۶]

۵. تحلیل پارامتریک

در بخش ۴، به منظور انجام تحلیل حساسیت، بدون توجه به مقادیر ضریب تغییرات انتخاب‌شده در پژوهش حاضر، برای هر پارامتر مقادیر ضریب تغییرات کمینه تا بیشینه‌ی پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف انتخاب و نتایج تحلیل‌ها برای ۴ مقدار در بازه‌ی مذکور محاسبه شده است.

در بخش حاضر، برای ارزیابی نحوه و میزان تغییرات نتایج تحلیل‌های انجام‌یافته در اثر تغییر COV پارامترها از مقادیر درج‌شده در جدول ۲، بر روی یک نمونه خاک روانگرشده (مورد یک) و یک نمونه خاک روانگرانشده (مورد چهار) از موارد تاریخچه‌ی مندرج در جدول ۱ تحلیل پارامتریک انجام شده است. در تحلیل‌های صورت‌گرفته، برای هر پارامتر با ثابت نگه‌داشتن مشخصات سایر پارامترها، در دو مرحله COV مرتبط افزایش یافته است. مقدار افزایش COV در هر مرحله به اندازه‌ی ۲۵٪ مقدار COV درج‌شده در جدول ۲ برای همان پارامتر انتخاب شده است. سپس در دو مرحله‌ی دیگر برای هر پارامتر، COV مرتبط با ثابت نگه‌داشتن سایر مشخصات کاهش یافته است. این کاهش نیز در هر مرحله به اندازه‌ی ۲۵٪ مقدار COV درج‌شده در جدول ۲ برای همان پارامتر انتخاب شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

با دقت در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که افزایش COV یک متغیر می‌تواند باعث افزایش احتمال روانگرایی در یک خاک و کاهش احتمال روانگرایی در خاکی دیگر شود. همچنین می‌توان گفت خاک‌های مختلف حساسیت‌های متفاوتی را نسبت به تغییر COV پارامترها از خود نشان می‌دهند، به نحوی که نمی‌توان یک پارامتر را حساس‌ترین پارامتر در تحلیل روانگرایی بیان کرد. بی‌توجهی به این نکته و استفاده از تعداد محدودی نمونه برای تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت و سپس نتیجه‌گیری کلی از آن باعث شده است که برخی پژوهشگران در مطالعات خود، افزایش احتمال روانگرایی با افزایش COV یک پارامتر و برخی دیگر کاهش احتمال روانگرایی با افزایش COV همان پارامتر را گزارش کنند. [۱۶ و ۲۶] چنین روندی باعث ایجاد اختلاف‌هایی در پیش‌بینی روانگرایی براساس نتایج مذکور شده است.

۶. بررسی تأثیر عمق در احتمال روانگرایی

در نوشتار حاضر، عمق لایه‌ی خاک به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته شده و از عدم قطعیت‌های مربوط به آن صرف‌نظر شده است. در بخش کنونی، تحلیل‌هایی برای خاک مورد یک از موارد تاریخچه‌ی مندرج در جدول ۱ انجام شده است، که در آن‌ها عمق لایه‌ی خاک از ۴/۶ متر مندرج

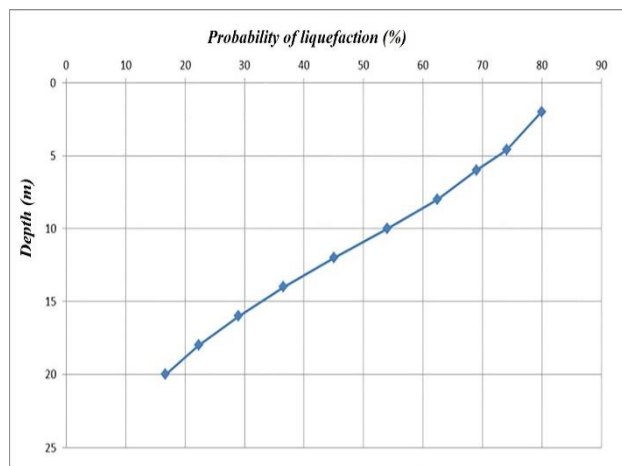
^۱ Cumulative Distribution Function

۵. نتیجه‌گیری

براساس نتایج پژوهش حاضر می‌توان گفت روش قطعی تعیین پتانسیل روانگرایی خاک، روش مطمئنی برای ارزیابی روانگرایی خاک نیست و استفاده از روش تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی، ابزار مناسبی را برای قضاوت مهندسی در اختیار متخصصان قرار می‌دهد.

با مقایسه‌ی بی‌کی از نتایج حاصل از روش IHS با روش شبیه‌سازی MC صورت گرفت، مشخص شد که روش IHS قابلیت تحلیل روانگرایی خاک را دارد و می‌تواند با هزینه‌ی محاسباتی کمتر نسبت به روش شبیه‌سازی MC نتایج دقیقی را ارائه کند. از آنجایی که استفاده از روش شبیه‌سازی MC به عنوان روش معیاری، در مطالعات روانگرایی رایج است، می‌توان پیشنهاد کرد در آینده از روش IHS به جای روش شبیه‌سازی MC در مطالعات قابلیت اعتماد روانگرایی استفاده شود.

با انجام تحلیل حساسیت مبتنی بر ضریب تغییر پارامترهای مؤثر در روانگرایی بر روی محدوده‌ی نسبتاً وسیعی از احتمال روانگرایی، مشخص شد بسته به شرایط ممکن است ضریب تغییر پارامترهای مختلف، بیشترین تأثیر را در احتمال روانگرایی داشته باشند، در برخی موارد تأثیر مذکور می‌تواند مقدار قابل ملاحظه‌ی باشد.



شکل ۱۲. تغییر احتمال روانگرایی با تغییر عمق.

لایه‌ی خاک مشاهده می‌شود. اگر طبقه‌بندی جوانگ و همکاران (۲۰۰۰) در خصوص معیار $PL < ۳۵\%$ به عنوان معیار عدم روانگرایی در نظر گرفته شود، می‌توان بیان کرد که خاک با مشخصات درج شده برای مورد یک از جدول ۱، در صورتی که در عمق بیش از ۱۴ متری از سطح زمین واقع شود، روانگرا نخواهد شد.

References- منابع

- Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J Soil Mech Found ASCE* 97(9):1249-1273. doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662.
- Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., Powell, D., 1982. *Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method* (Vol. 138). Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards.
- Law, K. T., Cao, Y. L., He, G. N., 1990. An energy approach for assessing seismic liquefaction potential. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 320-329. doi.org/10.1139/t90-043.
- Seed, H. B., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake Engineering Research institute*.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W., 2006. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(2-4), 115-130. doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.023
- Johari, A., Fazeli, A., & Javadi, A. A., 2013. An investigation into application of jointly distributed random variables method in reliability assessment of rock slope stability. *Computers and Geotechnics*, 47, 42-47. doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.07.003
- Youd, T. L., Idriss, I. M., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297-313. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297)
- Golmoghani Ebrahimi, S., Noorzad, A., & Kupaei, H. J., 2023. Reliability Analysis of Soil Liquefaction Using Improved Hypercube Sampling (IHS) Method. *International Journal of Civil Engineering*, 1-13. doi.org/10.1007/s40999-023-00863-z

9. Johari, A., Pour, J. R., & Javadi, A., 2015. Reliability analysis of static liquefaction of loose sand using the random finite element method. *Engineering Computations*, 32(7), 2100-2119. doi.org/10.1108/EC-07-2014-0152
10. Johari, A., Khodaparast, A. R., & Javadi, A. A., 2019. An analytical approach to probabilistic modeling of liquefaction based on shear wave velocity. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 43, 263-275. doi.org/10.1007/s40996-018-0163-7
11. Sett, S., & Chattopadhyay, K. K., 2022. Liquefaction mapping of Kolkata city using FOSM method. In *Earthquake Geotechnics: Select Proceedings of 7th ICRAEE 2021* (pp. 207-223). Springer Singapore.
12. Duan, W., Zhao, Z., Cai, G., Pu, Sh., Liu, S., Dong, X., 2022. Evaluating model uncertainty of an in situ state parameter-based simplified method for reliability analysis of liquefaction potential. *Computer and Geotechnics*, Vol. 151, 104957. doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104957
13. Kwak, B. M., Lee, T. W., 1987. Sensitivity analysis for reliability-based optimization using an AFOSM method. *Computers & structures*, 27(3), 399-406. doi.org/10.1016/0045-7949(87)90064-2
14. Jha, S. K., Suzuki, K., 2009. Reliability analysis of soil liquefaction based on standard penetration test. *Computers and Geotechnics*, 36(4), 589-596. doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.10.004
15. Popescu, R., Prevost, J. H., Deodatis, G., 2005. 3D effects in seismic liquefaction of stochastically variable soil deposits. *Geotechnique*, 55(1), 21-31. doi.org/10.1680/geot.2005.55.1.21
16. Kasebzadeh, J., Noorzad, A., Mahboubi, A. R., 2015. Reliability Analysis of Liquefaction Utilizing Monte Carlo Simulation Based on Simplified Stress Method. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 17(4), 233-248.
17. Beachkofski, B., Grandhi, R., 2002. Improved distributed hypercube sampling. In *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference* (p. 1274). doi.org/10.2514/6.2002-1274
18. Boulanger, R. W., Idriss, I. M., 2014. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. *Report No. UCD/CGM.-14, 1*.
19. Duncan, J. M., 2000. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(4), 307-316. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307)
20. Phoon, K. K. (Ed.), 2008. *Reliability-based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications*. CRC Press.
21. Chandler, D. S., 1996. Monte Carlo simulation to evaluate slope stability. In *Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice* (pp. 474-493). ASCE.
22. Hammond, C. J., Prellwitz, R. W., Miller, S. M., 1992. Landslide hazard assessment using Monte Carlo simulation. In *Proceedings of 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, Balkema* (Vol. 2, pp. 251-294).
23. Harr, M. E., 1984. Reliability-based design in civil engineering, 1984 Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC.
24. Jones, A. L., Kramer, S. L., Arduino, P., 2002. *Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
25. Juang, C. H., Chen, C. J., Jiang, T., & Andrus, R. D., 2000. Risk-based liquefaction potential evaluation using standard penetration tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1195-1208. doi.org/10.1139/t00-064
26. Ayad, F., Bekkouche, A., Houmadi, Y., 2014. Sensitivity analysis of soil liquefaction potential. *Earth Science Research*, 3(1), 14. dx.doi.org/10.5539/esr.v3n1p14