

بررسی پارامترهای موثر در روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای سست با استفاده از روش مربع لاتین بهبود یافته

سعید گلمغانی ابراهیمی

گروه ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیکی: saeed.golmoghany@srbiau.ac.ir

علی نورزاد

دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، تهران، ایران

پست الکترونیکی: a_noorzad@sbu.ac.ir

حسین جواهری کوپائی

گروه ژئوتکنیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیکی: h-javaheri@srbiau.ac.ir

چکیده:

وقوع پدیده روانگرایی در خاک‌های سست ماسه‌ای در شرایط اشباع تحت بارهای لرزه‌ای موجب می‌شود ذرات خاک تمایل به کاهش حجم داشته باشند. به طوری که در صورت عدم امکان زهکشی، فشار آب حفره‌ای درون خاک افزایش یافته و در شرایط تنش ثابت، تنش موثر بین ذرات به صفر نزدیک می‌شود. در چنین حالتی ذرات خاک هیچ‌گونه مقاومت برشی نداشته و حالت روانگرایی رخ می‌دهد. در این پژوهش تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها با استفاده از آخرین اصلاحات ارائه شده توسط ادیس و بولانژه (۲۰۱۴) برای روش ساده شده و با به‌کارگیری روش مربع لاتین بهبود یافته (IHS) انجام شد. مقایسه نتایج روش IHS با شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که روش پیشنهادی برای تحلیل روانگرایی قابل اعتماد می‌باشد. تحلیل حساسیت انجام یافته بر روی محدوده وسیعی از خاک‌های روانگرا و غیر روانگرا بر مبنای ضرایب تغییرات پارامترها نشان داد که تغییرپذیری پارامترهای خاک و بارگذاری زلزله می‌تواند تاثیر مهمی بر احتمال روانگرایی داشته باشد.

واژگان کلیدی:

روانگرایی، عدم قطعیت، خاک سست ماسه‌ای، تحلیل قابلیت اعتماد، نمونه‌گیری مربع لاتین بهبود یافته (IHS)

An Investigation on the Effective Parameters of Loose Sands Liquefaction Potential Using Improved Hypercube Sampling Method

S. Golmoghani Ebrahimi¹, A. Noorzad^{1*}, H. Javaheri Koupaei¹

¹ Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^{*} Dean, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract:

The occurrence of liquefaction phenomenon in saturated loose sandy soils under seismic loads causes the soil particles to tend to decrease in volume. So that if drainage is not possible, the pore water pressure inside the soil increases and in constant stress conditions, the effective stress between particles approaches zero. In this case, the soil particles have no shear resistance and liquefaction occurs. Liquefaction is one of the important issues of concern in seismic geotechnical engineering, which involves many uncertainties in soil and earthquake parameters. The most common method to evaluate the potential of liquefaction is deterministic method which cannot consider the pertinent uncertainties. Soil properties are uncertain due to various sources of variability of soil deposit formation. Currently there is less reliable procedure to account for all pertinent uncertainties in predicting the occurrence of soil liquefaction phenomena when subjected to strong ground motion. In this research, liquefaction reliability analysis was performed by considering the soil and earthquake loading uncertainties using the latest modifications provided by Idris and Boulanger (2004) for the simplified method and using the improved hypercube sampling (IHS) method. Comparing the results of IHS method with Monte Carlo simulation showed that the proposed method is reliable for liquefaction analysis. The analyses have been performed on well-documented historical cases. The Monte Carlo method has been accepted as the benchmark method in most studies based on liquefaction reliability analysis. Comparison of the Monte Carlo (MC) method and IHS results indicate that the IHS method is more accurate, reliable, and capable over MC for analyzing the reliability of liquefaction and can be used as a benchmark approach in future studies. The results show that the proposed approach is a favorable and useful tool for the reliability analysis of liquefaction potential estimations. Sensitivity analysis based on the coefficient of variation on a wide range of liquefaction and non-liquefaction case histories illustrate that the variability of soil parameters and earthquake loading can have an important effect on the probability of liquefaction. It is worthy to note that different parameters may have the most effect on the probability of liquefaction depending on soil conditions.

Keywords: liquefaction, uncertainty, loose sandy soil, reliability analysis, improved hypercube sampling

انجام شده [۸] و تا کنون از آن برای تحلیل حساسیت روانگرایی خاک استفاده نشده است.

در این روش پس از ایجاد نمونه های تصادفی، نمونه ها دسته بندی شده و از هر دسته یک نمونه انتخاب می شود. این کار باعث کاهش تعداد نمونه ها می شود. نمونه معرف هر دسته به گونه ای انتخاب می شود که فاصله بهینه با سایر نقاط دسته داشته باشد. این روش تمام مزایای انتخاب نمونه تصادفی را داشته و نسبت به شبیه سازی مونت کارلو از سهولت محاسباتی و سرعت عمل بیشتری برخوردار است. بنابراین، در مورد استفاده از روش های نمونه گیری طبقه بندی شده در مطالعات تحلیل قابلیت اطمینان روان گرایی، آگاهی کافی وجود ندارد.

در این مقاله ابتدا امکان سنجی تحلیل روانگرایی با استفاده از روش IHS بررسی شده است. برای این منظور، با انتخاب پارامترهای خاک و متغیرهای حرکت تصادفی زمین لرزه، احتمال روانگرایی برای شش حالت موردی با استفاده از روش IHS به دست آمده و مراحل محاسبه شرح داده شده است. از آنجایی که شبیه سازی مونت کارلو (MC) در اغلب منابع به عنوان روش معیار در ارزیابی احتمال روانگرایی مورد استفاده قرار گرفته است در این مطالعه احتمال روانگرایی خاک با استفاده از شبیه سازی MC و IHS محاسبه شده و نتایج آنها مقایسه می شود. سپس دقت روش IHS مورد بحث قرار گرفته و مشخص شد که این روش یک رویکرد جدید برای تحلیل قابلیت اطمینان روانگرایی خاک می باشد که می تواند زمان و هزینه محاسباتی را به میزان چشمگیری کاهش دهد. از آنجایی که تا کنون از روش IHS برای تحلیل حساسیت روانگرایی خاکها استفاده نشده است و تحلیل حساسیت انجام شده در مطالعات قبلی با روشهای دیگر بر روی دامنه محدودی از خاکهای عمدتاً روانگرا انجام شده که همین مورد بر نتایج آنها تأثیر گذاشته باعث شده است محققین مختلف نتایج متناقضی در خصوص تأثیر پارامترهای مشخص گزارش نمایند [۱۶ و ۲۶]. در این پژوهش تحلیل حساسیت با استفاده از روش IHS و بر اساس ضریب تغییرات (COV) برای تعیین تأثیر پارامترهای مختلف بر احتمال روان گرایی انجام شد. تحلیل حساسیت بر روی طیف وسیعی از موارد روانگرا و غیر روانگرا انجام شد. مشخص شد که استفاده از یک محدوده خاص و محدود از پارامترها می تواند نتایج را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه های بدست آمده اختلاف هایی مشاهده شود.

روانگرایی یکی از علل مهم خرابی سازه ها می باشد. از زمان وقوع زلزله های سال ۱۹۶۴ نیگاتا و آلاسکا تا زلزله های سال های اخیر مطالعات گسترده ای در خصوص روانگرایی در سراسر جهان انجام گرفته است. در ایران نیز پدیده روانگرایی در نقاط مختلف مشاهده شده که در این خصوص می توان به مشاهدات موجود در زلزله سال ۱۹۹۰ رودبار و ۲۰۱۳ بوشهر اشاره نمود.

روابط مختلفی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک وجود دارند. این روابط عموماً براساس یکی از سه روش: مبتنی بر تنش تناوبی [۱]، کرنش تناوبی [۲] و روش انرژی [۳] توسعه داده شده اند. سید و ادیسی [۱] در سال ۱۹۷۱ روشی را مبتنی بر نتایج آزمایش SPT برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک ارائه نمودند که به روش ساده شده معروف می باشد. این روش مورد تایید آیین نامه های مختلف نیز قرار گرفته و مطالعات زیادی مبتنی بر این روش انجام شده است [۴-۱۰]. این روش قطعی بوده و از ضریب اطمینان (F_S) در برابر روانگرایی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک استفاده می کند.

از آنجایی که در روش های قطعی عدم قطعیت پارامترها لحاظ نمی شوند و با توجه به ماهیت احتمالاتی بارگذاری زلزله و عدم قطعیت های ذاتی و شناختی پارامترهای خاک، محققین مختلف از روش های تحلیل قابلیت اعتماد برای لحاظ کردن عدم قطعیت های موجود در پارامترهای مقاومتی خاک و بارگذاری زلزله در ارزیابی قابلیت روانگرایی خاک استفاده کرده اند. در حالت کلی روش های قابلیت اعتماد به دو گروه تقریبی و شبیه سازی تقسیم می شوند. از کارهای انجام یافته به روش تقریبی می توان به استفاده از روش لنگر دوم مرتبه اول (FOSM) [۱۱]، روش قابلیت اعتماد مرتبه اول (FORM) [۱۲] و روش لنگر دوم مرتبه اول پیشرفته (AFOSM) [۱۳] در تعیین پتانسیل روانگرایی خاک اشاره نمود. اغلب کارهای انجام یافته به روش شبیه سازی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو [۱۴-۱۶] انجام شده است، هرچند شبیه سازی مونت کارلو به دلیل پیچیدگی های محاسباتی چندان محبوب نبوده [۱۴] و بیشتر به عنوان معیاری برای ارزیابی سایر روش ها استفاده می شود. اخیراً روش های آماری که از نمونه گیری طبقه بندی شده استفاده کرده و در انتخاب نقاط نمونه هوشمندانه تر رفتار می کنند بیشتر از روش های سعی و خطایی مانند مونت کارلو مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از این روش ها روش نمونه گیری مربع لاتین بهبود یافته (IHS) می باشد [۱۷] که مطالعات اندکی در استفاده از این روش برای تحلیل روانگرایی

۲- مشخصات ژئوتکنیکی و لایه‌بندی خاک‌های مورد

مطالعه

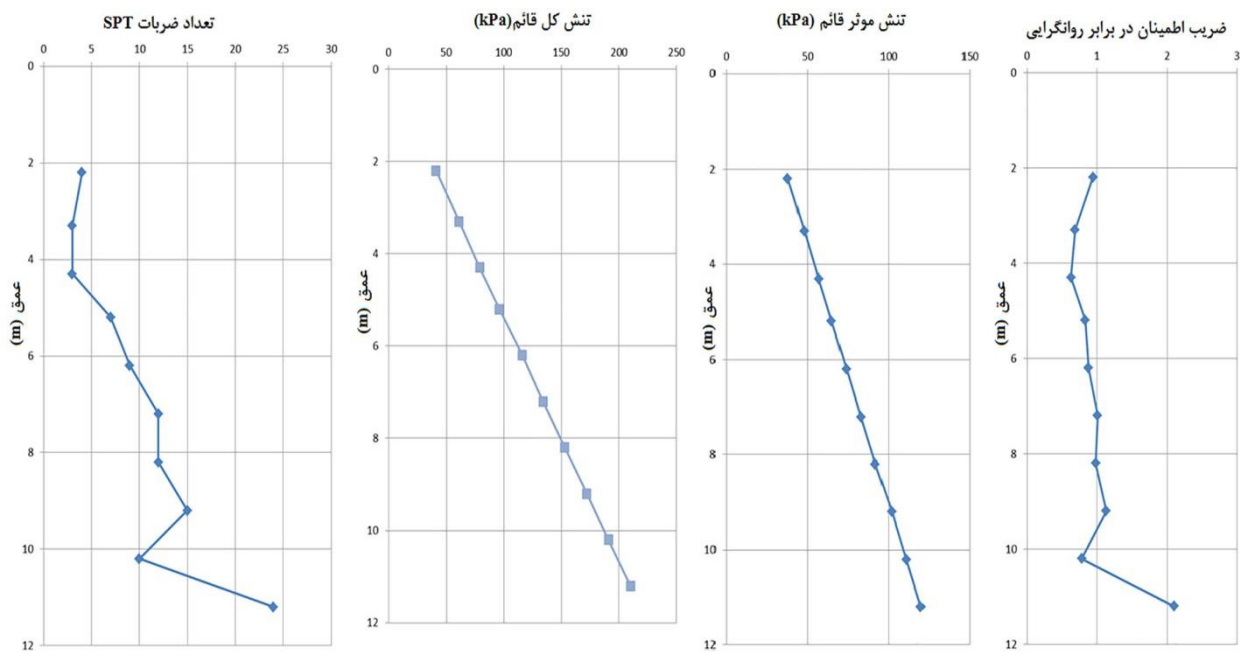
شد که هم دربرگیرنده موارد روانگرا و هم غیر روانگرا بوده و محدوده نسبتاً وسیعی از هر پارامتر موثر در روانگرایی را شامل می‌شود.

شکل ۱ مشخصات خاک استفاده شده در تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی نتایج و کاربرد روش‌های قطعی و قابلیت اعتماد ارزیابی روانگرایی، اطلاعات ژئوتکنیکی شش گمانه که توسط بولانژه و ادريس ۲۰۱۴ ارائه شده [۱۸] و در جدول ۱ آمده است، استفاده شد. این موارد تاریخچه‌ای به نحوی انتخاب

جدول ۱- مشخصات موارد تاریخچه‌ای منتخب برای انجام تحلیل‌های مقدماتی

Liq. ?	FC (%)	Avg. N_{spt}	σ'_v (kPa)	σ_v (kPa)	Avg. depth (m)	a_{max} / g	M	مورد	
Yes	۳۰	۷/۱	۵۴	۸۷	۴/۶	۰/۲۶	۵/۹	Westmorland earthquake (۱۹۸۱) - Wildlife B	۱
Yes	۵۰	۱۳/۶	۱۴۳	۱۵۶	۸/۵	۰/۸۴	۶/۶۹	Northridge earthquake (۱۹۹۴) - Balboa Biv. Unit C	۲
Yes	۲۰	۵	۴۵	۷۵	۴	۰/۲	۸/۳	Tokachi-Oki earthquake (۱۹۶۸) - Nanaehama ۱-۲-۳	۳
No	۲	۲۰	۱۰۹	۱۹۰	۱۰/۱	۰/۱۸	۷/۶	Niigata earthquake (۱۹۶۴) - Old Town -۲	۴
No	۶۶	۲/۶	۵۴	۸۱	۴/۲۹۵	۰/۰۵۲	۷/۷	Nihonkai-Chubu earthquake (۱۹۸۳) - Hakodate	۵
Yes	۱۳	۲۰	۱۰۸	۱۳۰	۷	۰/۳۹	۶/۹۳	Loma Prieta earthquake (۱۹۸۹) - Miller Farm CMF ۵	۶



شکل ۱- مشخصات خاک گمانه مورد بررسی در تحلیل حساسیت

انستیتوی نسله

برای انجام تحلیل حساسیت، مشخصات یک گمانه که تحت تاثیر زلزله ۱۶ ژوئن سال ۱۹۶۴ نیگاتا^۱ در محل کاواگیشی-چو^۲ قرار گرفته و توسط بولانزه و ادیس در سال ۲۰۱۰ گزارش شده است، انتخاب شد. زلزله تجربه شده توسط این گمانه دارای $M = 7/6$ و $a_{max} = 0/162g$ بوده است.

۳- تحلیل موارد تاریخچه‌ای برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی

روانگرایی خاک با استفاده از یک روش قطعی مبتنی بر آزمایش SPT و قابلیت اعتماد توسط شبیه سازی MC و IHS مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. همچنین برای تحلیل حساسیت از روش تحلیل قابلیت اعتماد به روش IHS استفاده می‌شود.

۳-۱- ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش قطعی

روش مبتنی بر آزمایش SPT برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی که اولین بار توسط سید و ادیس در سال ۱۹۷۱ توسعه داده شد طی دهه‌ها سال بعنوان روش استاندارد در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. آخرین به‌روزرسانی در روابط مبتنی بر آزمایش SPT توسط ادیس و بولانزه در سال ۲۰۱۴ انجام یافته است [۱۸]. برای ارزیابی روانگرایی، نسبت تنش تناوبی (CSR) در عمق دلخواه z اغلب به صورت مقدار معرف معادل ۶۵٪ نسبت تنش برشی تناوبی بیان می‌شود که به صورت زیر 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 (برحسب کیلو پاسکال) در عمق z (بر حسب متر)، $\sigma'_{v'}$ تنش موثر قائم (بر حسب کیلو پاسکال)، $\frac{a_{max}}{g}$ حداکثر شتاب افقی (به صورت نسبتی از شتاب ثقل) در سطح زمین و r_d ضریب کاهش تنش برشی به منظور لحاظ نمودن پاسخ دینامیکی پروفیل خاک می‌باشد. در این رابطه r_d به صورت زیر بیان می‌شود:

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

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (3)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (4)$$

در این روابط z عمق خاک به متر و عبارت داخل \sin به رادیان می‌باشد. نسبت مقاومت تناوبی (CRR) ظرفیت خاک برای مقاومت در برابر روانگرایی را بیان می‌کند. رابطه CRR برای یک $M = 7/5$ و $\sigma'_v = 1atm$ مبنا ارائه شده و برای سایر مقادیر M و σ'_v با استفاده از روابط زیر اصلاح می‌شود:

$$CRR_{M, \sigma'_v} = CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1} . MSF . K_\sigma \quad (5)$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left[8.64 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325 \right] \quad (6)$$

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5}\right)^2 \leq 2.2 \quad (7)$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (8)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (9)$$

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \quad (10)$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (11)$$

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_R C_B C_S N_m \quad (12)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (13)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left[1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right] \quad (14)$$

$$(15)$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp\left[\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]$$

در این روابط P_a فشار اتمسفر و FC محتوای ریزدانه خاک و C_N ضریب اصلاح سربار، C_E ضریب اصلاح انرژی، C_R ضریب اصلاح طول، C_S ضریب اصلاح تصحیح برای قطرهای غیر استاندارد گمانه، C_B ضریب اصلاح برای استفاده از نمونه‌گیر دو کفه‌ای و N_m تعداد ضربات اندازه گیری شده در آزمایش SPT است.

ضریب اطمینان در برابر روانگرایی (F_S) از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

اگر $F_S \leq 1$ خاک روانگرا شده و در صورتی که $F_S > 1$ روانگرایی اتفاق نخواهد افتاد.

۳-۲- ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش قابلیت اعتماد

برای انجام تحلیل قابلیت اعتماد لازم است مراحل زیر انجام گیرد.

الف- تعیین تابع حالت حدی.

ب- تعریف میانگین و انحراف معیار هر پارامتر خاک.

ج- محاسبه ماتریس هم‌بستگی برای این پارامترها.

د- محاسبه احتمال روانگرایی.

تحلیل قابلیت اعتماد همواره با فرموله کردن تابع حالت حدی مساله مورد مطالعه شروع می‌شود. در مورد روانگرایی، تابع حالت حدی

جدول ۲- محدوده ضرایب تغییرات متعارف برای متغیرهای تصادفی ورودی [۲۰]

متغیر تصادفی	محدوده متعارف برای COV
$N_{1,60}$	۰/۱-۰/۴
FC	۰/۰۵-۰/۳۵
σ'_v	۰/۰۵-۰/۲
σ_v	۰/۰۵-۰/۲
a_{max}	۰/۱-۰/۲
M	۰/۰۵-۰/۱

جدول ۳- ضرایب هم‌بستگی بین شش متغیر تصادفی ورودی [۲۰]

متغیر	$N_{1,60}$	FC	σ'_v	σ_v	a_{max}	M
$N_{1,60}$	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

با توجه به موارد فوق در تحلیل‌های انجام یافته در بخش‌های بعدی ابتدا ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی انتخابی مطابق مقادیر درج شده در جدول ۴ قرار داده شده و سپس در زمان انجام تحلیل حساسیت از محدوده ارائه شده در جدول ۱ استفاده خواهد شد.

جدول ۴- مشخصات مورد استفاده برای متغیرهای تصادفی

متغیر	$N_{1,60}$	FC	σ'_v	σ_v	a_{max}	M
COV	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۵	۰/۰۷۵

۳-۳- شبیه سازی مونت کارلو

شبیه سازی مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که برای محاسبه نتایج از نمونه‌گیری تصادفی تکرارشونده استفاده می‌کند. در شبیه سازی مونت کارلو برای تعیین کمی عدم قطعیت‌های مدل، برای هر یک از متغیرهای تصادفی ورودی یک تابع توزیع احتمال در نظر گرفته می‌شود. در صورتیکه متغیرهای ورودی مدل به صورت غیرقطعی توصیف شوند، خروجی‌های مدل نیز لزوماً غیر قطعی خواهند بود و به یک جواب واحد ختم نمی‌شوند. در این روش برای هر پارامتر ورودی تصادفی با توجه به شکل تابع چگالی احتمال آن و دامنه تغییراتش، اعداد تصادفی ایجاد می‌شود. اعداد تصادفی ساخته شده، در

یا تابع عملکرد تابعی است که منطقه روانگرا را از غیر روانگرا جدا می‌کند و بصورت زیر بیان می‌شود:

$$G(X) = CRR - CSR = 0 \quad (17)$$

به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای سازنده CRR و CSR این پارامترها با متغیرهای تصادفی تعریف می‌شوند. برای محاسبه CSR دو متغیر تصادفی تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد (N_{spt}) و محتوای ریزدانه (FC) و برای محاسبه CRR ، چهار متغیر تصادفی a_{max} ، M ، σ_v ، σ'_v مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

بنابراین $G(X)$ تابعی از شش متغیر تصادفی است که بصورت زیر بیان می‌شود:

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

احتمال روانگرایی با انتگرال‌گیری از رابطه فوق بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_f = P(g(X) \leq 0) = \int_{g(X) \leq 0} f_X(X) dX \quad (19)$$

که در آن $f_X(X)$ تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی می‌باشد.

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 این مطالعه فرض می‌شود که هر شش متغیر تصادفی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند.

برای محاسبه انحراف معیار متغیرهای تصادفی چهار روش که می‌توان از آنها در شرایط مختلف استفاده کرد، عبارتند: از محاسبه از روی داده‌های موجود، مقادیر منتشر شده، قانون سه سیگما، قانون سه سیگمای ترسیمی [۱۹]. در این پژوهش انحراف معیار با استفاده از مقادیر منتشر شده برای ضریب تغییرات و از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

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

که در آن σ انحراف معیار^۳، ضریب COV تغییرات^۴ و \bar{x} مقدار میانگین می‌باشد.

فون [۲۰] در سال ۲۰۰۸ کارهای انجام یافته قبلی پژوهشگران مختلف را جمع بندی و ارزیابی نموده و جدول ۲ را برای تعیین ضرایب تغییرات متغیرهای تصادفی پیشنهاد نمود. همچنین ضرایب هم‌بستگی بین متغیرهای تصادفی را به صورت جدول ۳ ارائه کرد که در این پژوهش برای انتخاب محدوده COV و ضریب هم‌بستگی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

^۳ Standard deviation
^۴ Covariance

تابع عملکرد قرار داده شده و این فرایند تا آنجا ادامه می‌یابد که به طور تقریبی تابع چگالی ضریب اطمینان تعیین شده و با توجه به آن احتمال گسیختگی محاسبه می‌شود.

شبیه‌سازی مونت کارلو دارای چهار مرحله می‌باشد [۲۱-۲۲]:

- 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 انتخاب شده در مرحله اول محاسبه می‌شود.
- مراحل یک و دو به تعداد بسیار زیادی تکرار شده و مقدار ضریب اطمینان برای هر تکرار، تعیین می‌شود.
- با استفاده از مقادیر ضریب اطمینانی که از مراحل قبل به دست آمده است، می‌توان احتمال وقوع شرایط نامناسب ($F_S < 1$)، مقدار میانگین، واریانس ضریب اطمینان و شکل تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان را به دست 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 رابطه زیر تقریب زد [۲۳-۲۴]:

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

در این رابطه، 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 است.

۳-۴- 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 رابطه ارائه شده برای تعداد تکرارهای لازم در حل مسائل با شبیه‌سازی مونت کارلو، هنگامی که ابعاد مسئله اضافه می‌شود، محاسبات به طرز ناامید کننده‌ای افزایش پیدا می‌کند، 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، روش‌های احتمالاتی برای نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده مورد توجه قرار گرفته‌اند تا محل‌های نمونه هوشمندانه‌تر انتخاب شود. روش‌های نمونه‌گیری طبقه‌بندی شده، بهبودیافته روش‌های نمونه‌گیری تصادفی هستند. این روش‌ها از یک طرح برای انتخاب نقاطی که بهترین پوشش فضا را داشته باشند استفاده می‌کنند. در این روش‌ها قبل از اینکه تحلیل انجام شود، تلاش بیشتری برای انتخاب نقاط نمونه انجام می‌گیرد تا این نقاط بتوانند متغیرهای طراحی مورد نظر را در تمام فضای طراحی پوشش دهند. یکی از چنین روش‌هایی روش نمونه‌گیری مربع لاتین بهبودیافته^۵ می‌باشد که به اختصار IHS نامیده می‌شود [۲۱]. نمونه‌گیری IHS، از نمونه‌گیری بسیار ساختار یافته‌ای

استفاده می‌کند، در حالی که طبیعت اتفاقی اولیه سیستم برای برآورد خطا را نیز حفظ می‌نماید.

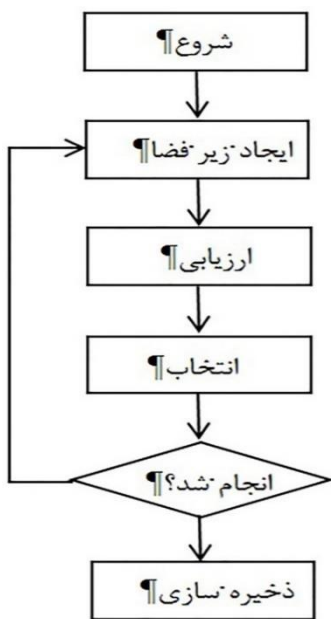
در این روش کلیه نقاط تصادفی تولید شده به سبدهایی تقسیم می‌شوند. از هر سبد نقاطی به عنوان نماینده انتخاب می‌شوند که فاصله آنها از سایر نقاط انتخابی برابر یک مقدار بهینه باشد. این فاصله بهینه توسط رابطه ۲۴ تعیین می‌شود که در آن n تعداد سبدها و m تعداد ابعاد می‌باشد. در این روش پس از ایجاد نقاط تصادفی، فاصله هر نقطه با تمام نقاط دیگر مقایسه شده و نقطه‌ای که مجموعه مطلوب را ایجاد می‌کند از تمام نقاط ممکن انتخاب می‌شود. این پروسه تا زمانی که مجموعه کل نمونه انتخاب شوند تکرار می‌شود.

$$n^m = m \quad \text{حج} \quad (22)$$

$$\frac{n^m}{n} = \frac{m}{4} \quad \text{محج} \quad \text{نقط} \quad (23)$$

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

الگوریتم انتخاب نقاط نمونه در روش IHS در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- الگوریتم انتخاب نقاط نمونه در روش IHS

انجام محاسبات به روش IHS دارای گام‌های زیر خواهد بود:

- ۱- برای هر کدام از متغیرهای تصادفی ورودی، تعدادی نقاط تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت بین صفر و یک تولید می‌شود.
- ۲- از بین نقاط تولید شده برای هر متغیر تصادفی، تعداد نقاط مورد نیاز انتخاب می‌شود. این انتخاب به نحوی می‌باشد که هر نقطه انتخاب شده دارای فاصله بهینه از سایر نقاط تولید شده باشد.
- ۳- تابع چگالی احتمال مورد نظر برای هر متغیر تصادفی به نقاط انتخاب شده مربوط به آن متغیر تصادفی اعمال می‌شود.
- ۴- مقدار ضریب اطمینان با استفاده از تابع عملکرد و با توجه به مقدار عددی انتخاب شده در مرحله قبل محاسبه می‌شود.
- ۵- مرحله ۴ به تعداد نقاط انتخاب شده برای هر پارامتر تکرار شده 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 نمود.

۳-۵- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی با استفاده از شبیه سازی MC و IHS

از آنجایی که شبیه سازی MC در مطالعات متعددی برای تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی استفاده شده است، برای بررسی کارایی روش IHS در تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی، شش مورد تاریخچه‌ای با مشخصات مندرج در جدول ۱ با استفاده از شبیه سازی MC و IHS مورد تحلیل قرار گرفته و احتمال روانگرایی محاسبه شد.

برای انجام تحلیل‌ها با استفاده از شبیه سازی MC ابتدا تعداد تکرارهای لازم در شبیه سازی مونت کارلو با استفاده از رابطه ۲۱ و به صورت زیر تعیین شد:

$$N = \left(\frac{d^2}{4(1-\varepsilon)^2} \right)^m = \left(\frac{1/28^2}{4(1-0.8)^2} \right)^6 = 1,152,922$$

در جهت اطمینان تعداد تکرارهای شبیه سازی مونت کارلو برابر ۱/۲ میلیون تکرار در نظر گرفته شد.

جدول ۵- احتمال روانگرایی موارد تاریخچه‌ای منتخب حاصل از شبیه سازی مونت کارلو و IHS

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

برای بررسی تاثیر تعداد نقاط نمونه بر خروجی تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی به روش IHS، موارد مندرج در جدول ۱ با استفاده از ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ نقطه نمونه تحلیل و احتمال روانگرایی در هر مورد به دست آمد. نتایج حاصل از شبیه سازی MC و IHS برای موارد تاریخچه‌ای منتخب در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشند. همان‌طور که مشخص است نتایج حاصل از تنها ۱۰ نقطه نمونه روش IHS نیز توافق خوبی با نتایج شبیه سازی مونت کارلو با ۱/۲ میلیون نقطه ارزیابی دارد به نحوی که در بیشترین حالت اختلافی کمتر از ۷ درصد بین نتایج شبیه سازی مونت کارلو و IHS با ده نقطه نمونه وجود داشته و با افزایش تعداد نقاط نمونه در روش IHS اختلاف نتایج کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در تمام شش مورد تاریخچه‌ای نشان داده شده، نتایج حاصل از ۲۰۰۰ نقطه نمونه روش IHS اختلافی کمتر از ۰/۵ درصد با نتایج حاصل از تحلیل مونت کارلو (با ۱/۲ میلیون نقطه ارزیابی) دارند. این امر می‌تواند نشان دهنده کارایی بالای روش IHS در تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی باشد.

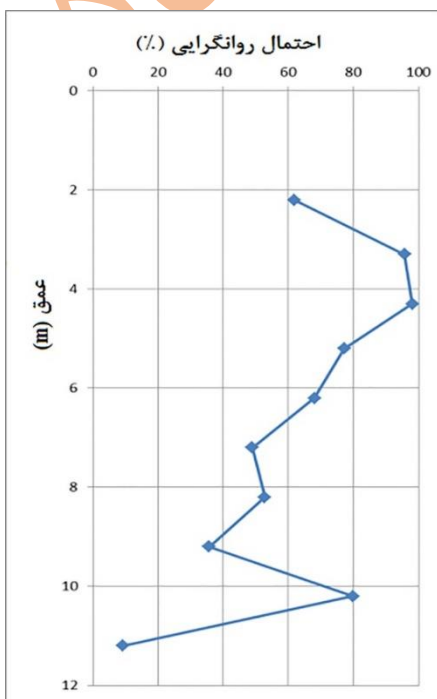
با مقایسه ضرایب اطمینان محاسبه شده برای شش مورد موجود در جدول ۱ با احتمال روانگرایی محاسبه شده در جدول ۵ مشخص می‌شود مواردی که در آنها احتمال روانگرایی کمتر از ۲۵ درصد به دست آمده است، روانگرا نشده و مواردی که احتمال روانگرایی در آنها بزرگ بوده است، روانگرا شده‌اند. در حالی که برای مورد ۶ علی‌رغم این که ضریب اطمینان بیش از یک محاسبه شده روانگرایی اتفاق افتاده است. لذا می‌توان گفت به دست آمدن ضریب اطمینان بزرگتر از یک در روش قطعی تضمین کننده عدم وقوع روانگرایی نمی‌باشد.

از آنجایی که برای مورد ششم جدول ۵، احتمال روانگرایی حدود ۵۰ درصد به دست آمده است، با استفاده از طبقه‌بندی چن و جوانگ [۲۰۰۰] [۲۵] می‌توان این قضاوت را داشت که وقوع و عدم وقوع روانگرایی در چنین خاکی محتمل می‌باشد، لذا با توجه به اهمیت سازه‌ای که بر روی این خاک قرار خواهد گرفت می‌توان در مورد صرف هزینه بیشتر برای اجتناب از روانگرایی خاک تصمیم‌گیری منطقی نمود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، روش قطعی برای این مورد ضریب اطمینان را بزرگتر از یک محاسبه نموده و خاک را غیر روانگرا طبقه بندی می‌نماید. بنابراین می‌توان گفت روش قابلیت اعتماد ابزار مناسب‌تری برای قضاوت مهندسی در خصوص روانگرایی در اختیار متخصصین ژئوتکنیک قرار می‌دهد.

۴- تحلیل حساسیت

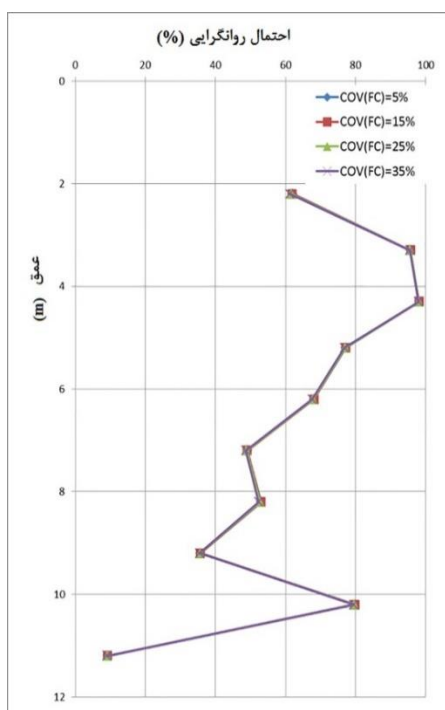
در این بخش برای تعیین تاثیر ضرایب تغییرات (COV) هر متغیر تصادفی بر روی پاسخ خاک، تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد. برای این کار، COV هر متغیر با ثابت نگهداشتن تمام مشخصات سایر پارامترها، در چند پله افزایش داده می‌شود. این افزایش در COV به نحوی انتخاب می‌شود که برای هر متغیر تصادفی کل محدوده ضرایب تغییرات درج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

برای انجام تحلیل حساسیت، گمانه‌ای با مشخصات ذکر شده در شکل ۱ انتخاب شد. در کل عمق این گمانه خاک دارای ۵٪ محتوای ریز دانه (FC) بوده و همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است ضریب اطمینان در برابر روانگرایی از حدود ۰/۶ تا ۲ در اعماق مختلف تغییر می‌نماید. بر اساس روش قطعی خاک فقط در اعماق ۹/۲ و ۱۱/۲ متری پدیده روانگرایی اتفاق نخواهد افتاد.



شکل ۳- احتمال روانگرایی در اعماق مختلف

نتایج حاصل از تحلیل‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مورد تغییر احتمال روانگرایی به اندازه‌ای کم است که در شکل ۵ هر چهار نمودار تقریباً بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. در این مورد افزایش ضریب تغییر محتوای ریزدانه در تمام موارد باعث کاهش احتمال روانگرایی شده است. با توجه به اینکه تغییر COV محتوای ریزدانه تاثیر بسیار کمی (کمتر از ۱٪) بر احتمال روانگرایی داشته است می‌توان در عمل از تاثیر این پارامتر بر احتمال روانگرایی صرف‌نظر نموده و فرض کرد که احتمال روانگرایی با تغییر COV محتوای ریزدانه خاک تقریباً ثابت بوده و تغییر نمی‌کند. از آنجایی که درصد ریزدانه خاک در مقادیر حدود ۳۰ درصد می‌تواند تاثیر زیادی در کاهش پتانسیل روانگرایی داشته باشد، نتایج نشان می‌دهد تغییر COV در بازه متعارف خود عملاً نمی‌تواند درصد ریزدانه را از ۵ درصد به حوالی ۳۰ درصد برساند و بنابراین ضریب تغییرات درصد ریزدانه، کمترین تاثیر را بر روانگرایی خاک خواهد داشت.



شکل ۵- تاثیر ضریب تغییر FC بر احتمال روانگرایی

۴-۳- بررسی تاثیر ضریب تغییر σ_p بر پاسخ خاک

برای بررسی تاثیر COV تنش کل قائم بر رفتار خاک، COV تنش کل برابر مقادیر ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ انتخاب شده و تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی در کل گمانه انجام شد. احتمال روانگرایی حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی در اثر تغییر COV تنش کل در شکل ۶ نمایش داده شده است.

همانطور که از شکل ۶ مشخص است، افزایش ضریب تغییر تنش کل از ۵٪ به ۲۰٪ باعث تغییر احتمال روانگرایی از ۹۷٪ تا ۹۳٪ درصد شده است. با دقت در شکل ۶ می‌توان دریافت، با افزایش عمق خاک تاثیر تغییر COV تنش کل بر روانگرایی خاک کاهش می‌یابد. از آنجایی که با افزایش عمق بر میزان تنش کل افزوده می‌شود می‌توان گفت هرچه تنش کل خاک بزرگتر باشد تاثیر تغییر COV تنش کل بر روانگرایی خاک کمتر خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهد که با بزرگتر شدن مقدار تنش کل، تغییرات جزئی در مقادیر تنش کل ناشی از تغییر COV نمی‌تواند تاثیر معنا داری در احتمال روانگرایی ایجاد نماید. این نتایج با گزارشات مختلف در خصوص روانگرا نشدن انواع خاکهای سست ماسه‌ای در اعماق زیاد توافق کامل دارد. به عبارتی با

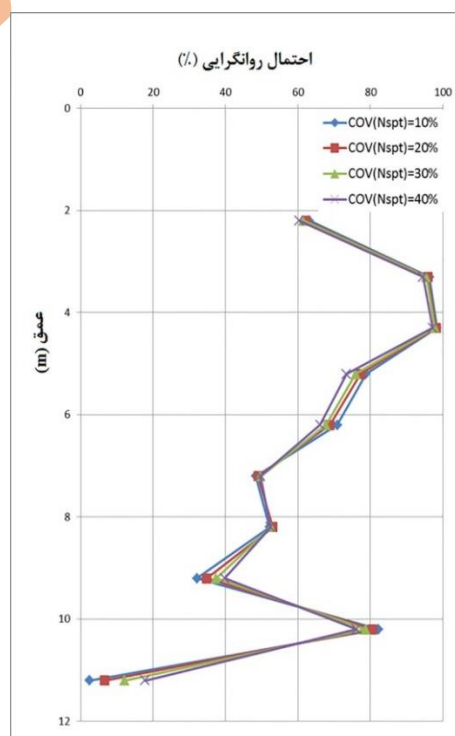
تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی با استفاده از روش IHS برای گمانه فوق‌الذکر انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. اگر طبقه‌بندی چن و جوانگ ۲۰۰۰ [۲۵] در نظر گرفته شود برای مواردی که $PL \leq 85\%$ باشد، وقوع روانگرایی حتمی خواهد بود. در این صورت می‌توان گفت روانگرایی خاک گمانه در اعماق ۳/۳ و ۴/۳ متری اتفاق خواهد افتاد. همانطور که از شکل ۳ مشخص می‌باشد تنها در اعماق ۹/۲ و ۱۱/۲ متری احتمال روانگرایی به میزان معنا داری بیش از ۵۰ درصد بوده است. همچنین احتمال روانگرایی در اعماق ۷/۲ و ۸/۲ متری حدود ۵۰ درصد می‌باشد. با دقت در مشخصات خاک گمانه در اعماق مختلف می‌توان دریافت در شرایطی که پارامترهای زلزله موثر بر نمونه خاک ثابت باشد تعداد ضربات SPT تاثیر بسیار زیادی بر احتمال روانگرایی داشته و درموردی که تعداد ضربات SPT بیشتر از ۱۲ می‌باشد احتمال روانگرایی به کمتر از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

۴-۱- بررسی تاثیر ضریب تغییر تعداد ضربات SPT بر

پاسخ خاک

برای بررسی تاثیر COV تعداد ضربات SPT بر پاسخ خاک، ضریب تغییرات عدد SPT برابر چهار مقدار ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ انتخاب شده و با ثابت نگه داشتن سایر مشخصات پارامترهای خاک، تحلیل‌ها در هر عمق تکرار می‌شود. نتایج تحلیل‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص می‌باشد، افزایش COV عدد SPT از ۱۰٪ به ۴۰٪ باعث تغییر احتمال روانگرایی از ۲٪ تا ۱۵/۳۸ درصد شده است. افزایش COV عدد SPT در مواردی که PL کمتر از ۵۰ درصد بوده باعث افزایش احتمال روانگرایی و در مواردی که PL بیشتر از ۵۰ درصد بوده باعث کاهش احتمال روانگرایی شده است.

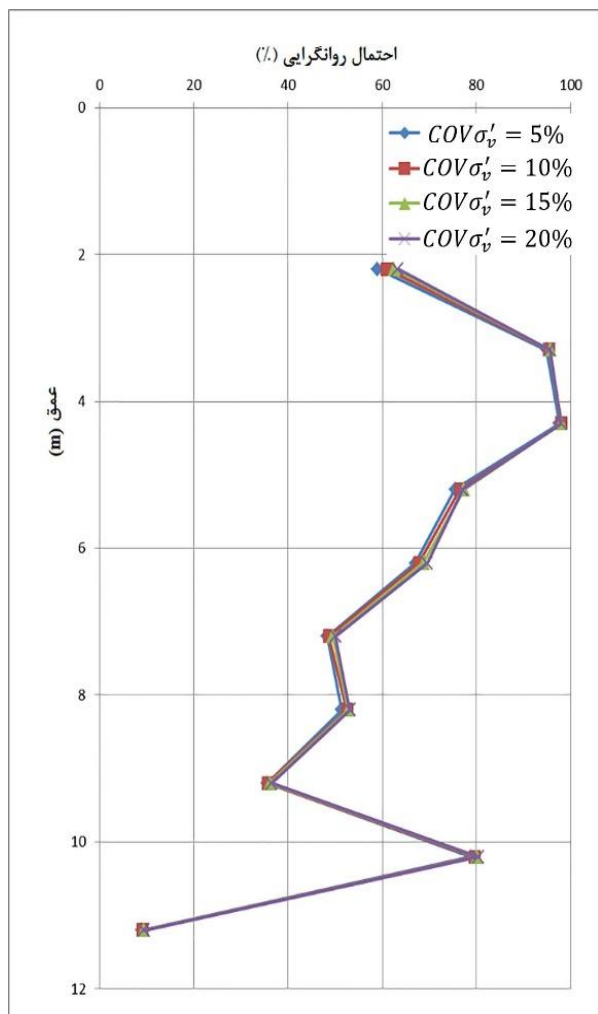


شکل ۴- تاثیر ضریب تغییر N_{spt} بر احتمال روانگرایی

۴-۲- بررسی تاثیر ضریب تغییر FC بر پاسخ خاک

برای بررسی تاثیر تغییر COV محتوای ریزدانه بر نتایج خروجی از تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی، ضریب تغییرات FC برابر ۵٪، ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ انتخاب شد.

بزرگتر شدن مقدار تنش کل وارد بر خاک، تاثیر تغییر مشخصات خاک کاهش می یابد.

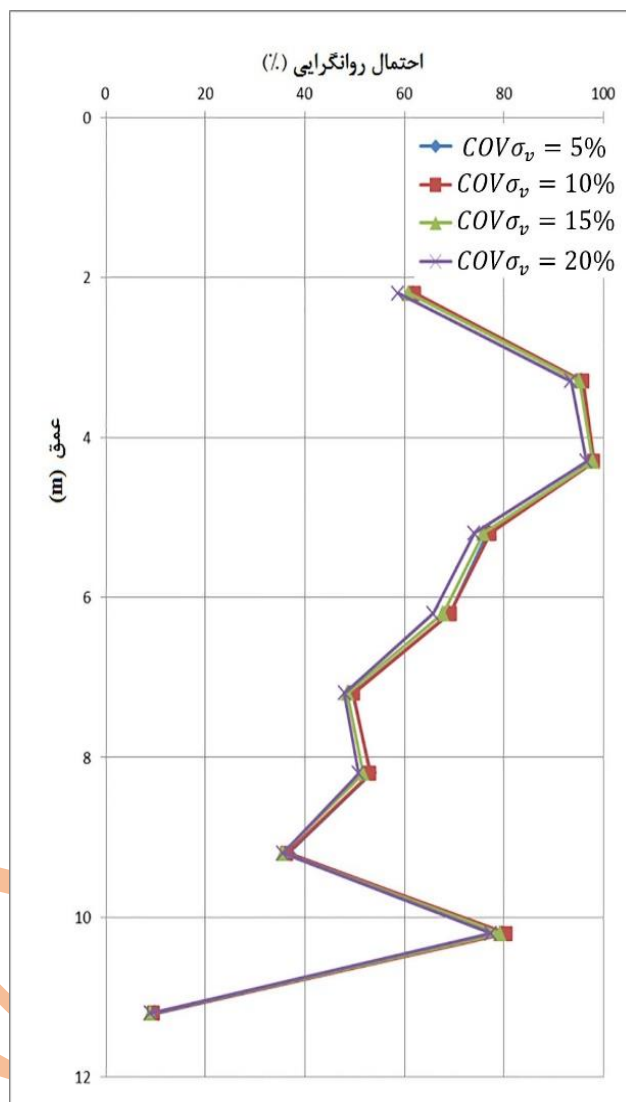


شکل ۷- تاثیر COV تنش موثر قائم خاک بر احتمال روانگرایی

۴-۵- بررسی تاثیر ضریب تغییر a_{max} بر پاسخ خاک

برای بررسی اثر تغییر COV حداکثر شتاب زلزله بر پاسخ خاک، مقادیر ۱۰٪، ۱۳٪، ۱۶٪ و ۲۰٪ برای ضریب تغییر حداکثر شتاب زلزله در نظر گرفته شد. شکل ۸ نتایج احتمال روانگرایی حاصل از تحلیل‌ها را نشان می‌دهد. در این مورد افزایش COV از ۱۰٪ تا ۲۰٪ باعث تغییر احتمال روانگرایی از ۰/۴۵ درصد تا ۸/۷۵ درصد شده است. افزایش COV در عمق‌های ۹/۲ و ۱۱/۲ متری گمانه باعث افزایش احتمال روانگرایی می‌باشد.

با توجه به اینکه در اعماق ۹/۲ و ۱۱/۲ متری از گمانه ضریب اطمینان محاسبه شده بالای یک و در سایر اعماق ضریب اطمینان کمتر از یک بوده است می‌توان بیان نمود که در خصوص خاکهایی که ضریب اطمینان در برابر روانگرایی کمتر از یک می‌باشد تغییرات $COV(a_{max})$ تاثیر بیشتری بر نتایج داشته و افزایش این پارامتر باعث کاهش احتمال روانگرایی محاسباتی می‌شود. همچنین از شکل ۸ مشخص است که با افزایش عمق خاک تاثیر $COV(a_{max})$ بر احتمال روانگرایی کمتر می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل افزایش تراکم خاک و افزایش تنش موثر باشد. به عبارت دیگر در خصوص خاکهای سست ماسه ای که آماده روانگرایی هستند، کوچکترین تغییرات در شتاب زمین (که از مهمترین پارامترهای موثر زلزله می‌باشد) می‌تواند باعث روانگرایی خاک شود در حالیکه در خاکهایی که عمق بیشتری داشته و تنش کل بالاتری را تحمل می‌کنند و همچنین خاکهای دارای عدد SPT بالاتر حساسیت کمتری نسبت به تغییر پارامتر شتاب زلزله داشته و تغییر پارامتر زمین لرزه تاثیر کمتری در ایجاد روانگرایی این خاکها خواهد داشت.



شکل ۶- تاثیر COV تنش کل قائم خاک بر احتمال روانگرایی

۴-۴- بررسی تاثیر ضریب تغییر σ'_v بر پاسخ خاک

با توجه به اینکه محدوده COV ارائه شده برای تنش قائم موثر و تنش قائم کل در مراجع مختلف با یکدیگر برابر می‌باشد، در این مورد نیز برای بررسی تاثیر تغییر COV تنش موثر قائم بر پاسخ خاک، سه مقدار ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ برای COV تنش موثر قائم در نظر گرفته شده و تحلیل‌ها انجام شد.

نتایج حاصل برای احتمال روانگرایی در گمانه مورد بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است. افزایش COV تنش قائم موثر از ۵٪ تا ۲۰٪ در تمام موارد باعث افزایش احتمال روانگرایی از ۰/۴ درصد تا ۴/۲۸ شده است. با توجه به همبستگی بالای تنش کل و تنش موثر، موارد مطرح شده در خصوص تنش کل، در این مورد نیز صادق است. تنها نکته قابل توجه در این مورد تاثیر بیشتر ضریب تغییرات تنش موثر نسبت به تنش کل می‌باشد که نشان می‌دهد تنش موثر اهمیت بیشتری از تنش کل در احتمال روانگرایی خاک دارد. علت این امر وابستگی مستقیم پارامترها مقاومتی خاک به تنش موثر وارد بر آن می‌باشد.

با توجه به اینکه در اعماق ۹/۲ و ۱۱/۲ متری ضریب اطمینان خاک بیشتر از یک و در اعماق ۸/۲ و ۷/۲ متری ضریب اطمینان تقریباً برابر یک بوده و در سایر اعماق بسیار کوچکتر از یک می باشد، می توان نتیجه گرفت که در خاکهای دارای ضریب اطمینان در برابر روانگرایی کوچکتر از یک، COV بزرگای زلزله تاثیر بیشتری بر احتمال روانگرایی داشته و در چنین خاکهایی، افزایش COV بزرگای زلزله باعث کاهش احتمال روانگرایی محاسبه شده می شود. این امر می تواند بنا به دلایل ذکر شده در بخش ۴-۵ باشد. همچنین از شکل ۹ مشخص است که بزرگا تاثیر کمتری نسبت به شتاب زلزله در روانگرایی خاک دارد. این امر به دلیل وابستگی بیشتر نسبت تنش تناوبی به شتاب زلزله می باشد.

۴-۷- مقایسه تاثیر ضریب تغییر پارامترهای مختلف بر

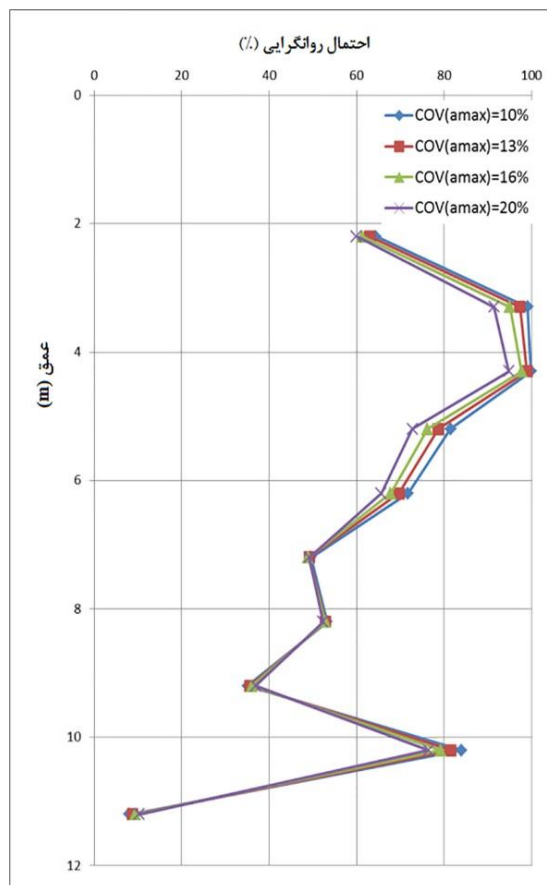
احتمال روانگرایی

در جدول ۶ میزان (قدرمطلق) اختلاف نتایج حاصل از تحلیل های انجام یافته با بیشترین و کمترین COV پارامترهای مختلف در هر عمق خاک درج شده است.

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

همان طور که مشاهده می شود در شش مورد $COV(a_{max})$ ، در دو مورد $COV(N_{spt})$ و در دو مورد $COV(\sigma_v)$ بیشترین تاثیر را بر احتمال روانگرایی داشته اند. همچنین در هشت مورد $COV(FC)$ ، در یک مورد $COV(M)$ و یک مورد $COV(N_{spt})$ کمترین تاثیر را در نتایج داشته اند. از نظر مقدار تاثیر نیز بالاترین میزان تاثیر مربوط به تغییر $COV(N_{spt})$ با ۱۵/۸۳ درصد و کمترین میزان تاثیر مربوط به $COV(FC)$ با ۰/۱ درصد بوده است. لذا می توان گفت بسته به شرایط مختلف ممکن است ضریب تغییر پارامترهای مختلف بیشترین تاثیر را بر احتمال روانگرایی داشته باشند به نحوی که پارامتری که در یک مورد بیشترین تاثیر را بر روانگرایی داشته است می تواند در شرایط دیگر کمترین تاثیر را بر احتمال روانگرایی داشته باشد. این نتیجه از آنجایی حاصل می شود که محدوده نسبتاً وسیعی از احتمال روانگرایی

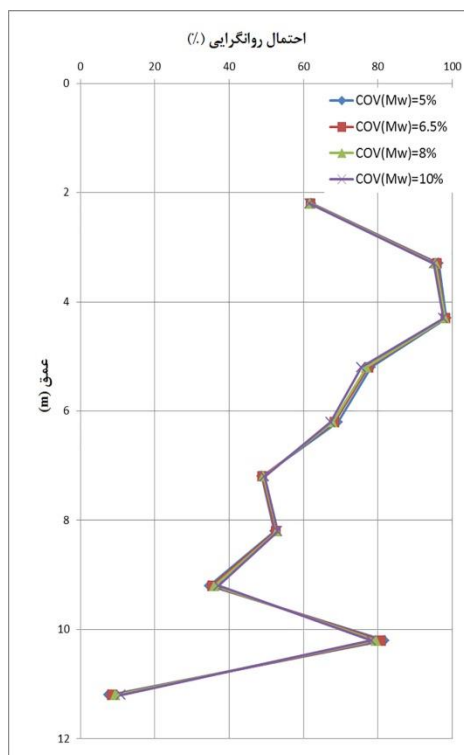


شکل ۸- تاثیر ضریب تغییر حداکثر شتاب زلزله بر پاسخ خاک

۴-۶- بررسی تاثیر ضریب تغییر بزرگای زلزله بر پاسخ خاک

باتوجه به محدوده پیشنهاد شده برای ضریب تغییر بزرگای زلزله توسط سایر محققین، COV بزرگای زلزله برابر مقادیر ۰/۵، ۶/۵٪، ۰/۸، و ۱۰٪ انتخاب و تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی انجام شد. نتایج تحلیل ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

در این مورد افزایش ضریب تغییر از ۰/۵ تا ۱۰٪ باعث تغییر احتمال روانگرایی از ۰/۵۳ درصد تا ۳/۶۵ درصد شده است. افزایش COV بزرگای زلزله در عمق های ۷/۲، ۸/۲، ۹/۲ و ۱۱/۲ متری گمانه باعث افزایش احتمال روانگرایی می باشد.



شکل ۹- تاثیر ضریب تغییر بزرگای زلزله بر پاسخ خاک

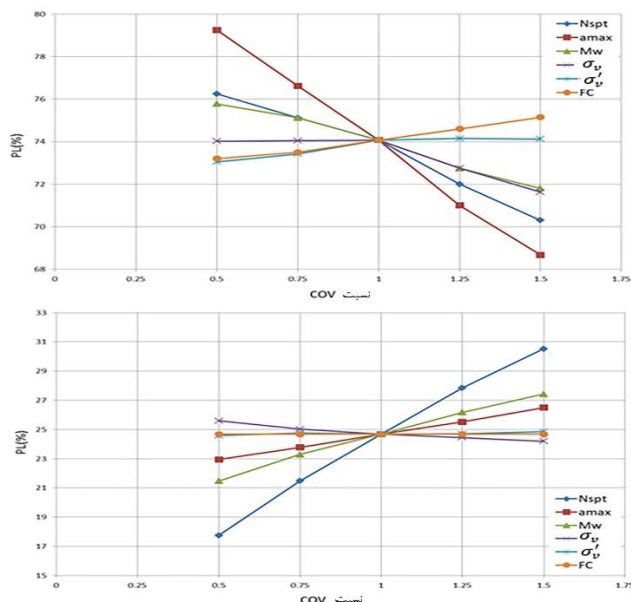
در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از محدوده کوچکی از احتمال روانگرایی می‌تواند باعث ایجاد روندی نادرست در ارزیابی تحلیل‌ها شده و نتایج گمراه‌کننده‌ای را به همراه داشته باشد. به همین دلیل برخی از محققین نتایجی مغایر با یکدیگر گزارش نموده‌اند [۱۶ و ۲۶].

۵- تحلیل پارامتریک

در قسمت قبل به منظور انجام تحلیل حساسیت، بدون توجه به مقادیر ضریب تغییرات انتخاب شده در پژوهش، برای هر پارامتر مقادیر ضریب تغییرات حداقل تا حداکثر پیشنهاد شده توسط پژوهشگران مختلف انتخاب شده و نتایج تحلیل‌ها برای چهار مقدار در این بازه محاسبه شد.

در این بخش برای ارزیابی نحوه و میزان تغییرات نتایج تحلیل‌های انجام یافته در اثر تغییر COV پارامترها از مقادیر درج شده در جدول ۲، بر روی یک نمونه خاک روانگرا شده (مورد یک) و یک نمونه خاک روانگرا نشده (مورد چهار) از موارد تاریخچه‌ای مندرج در جدول ۱ تحلیل پارامتریک انجام گرفت. در این تحلیل‌ها برای هر پارامتر با ثابت نگه داشتن مشخصات سایر پارامترها، در دو مرحله COV مربوطه افزایش یافت. مقدار افزایش COV در هر مرحله به اندازه ۲۵ درصد COV درج شده در جدول ۲ برای همان پارامتر انتخاب شد. سپس در دو مرحله دیگر برای هر پارامتر، COV مربوطه با ثابت نگه داشتن سایر مشخصات، کاهش یافت. این کاهش نیز در هر مرحله به اندازه ۲۵ درصد COV درج شده در جدول ۲ برای همان پارامتر انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

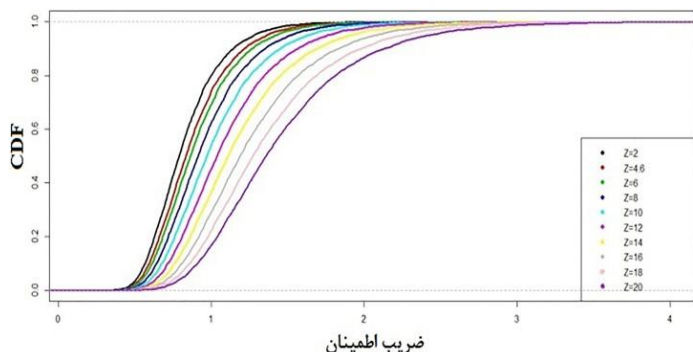
با دقت در این شکل‌ها مشخص می‌شود که افزایش COV یک متغیر می‌تواند باعث افزایش احتمال روانگرایی در یک خاک و کاهش احتمال روانگرایی در خاکی دیگر شود. همچنین می‌توان گفت خاک‌های مختلف حساسیت‌های متفاوتی را نسبت به تغییر COV پارامترها از خود نشان می‌دهند، به نحوی که نمی‌توان یک پارامتر را حساس‌ترین پارامتر در تحلیل روانگرایی بیان نمود. عدم توجه 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 کارهای خود افزایش احتمال روانگرایی با افزایش COV یک پارامتر و برخی دیگر کاهش احتمال روانگرایی با افزایش COV همان پارامتر را گزارش نمایند [۱۶ و ۲۶]. چنین روندی باعث ایجاد اختلافاتی در پیش‌بینی روانگرایی بر اساس نتایج مذکور شده است.



شکل ۱۰- تغییر احتمال روانگرایی در اثر تغییر گام به گام COV پارامترهای ورودی (الف) برای مورد یک و (ب) برای مورد چهار

۶- بررسی تاثیر عمق بر احتمال روانگرایی

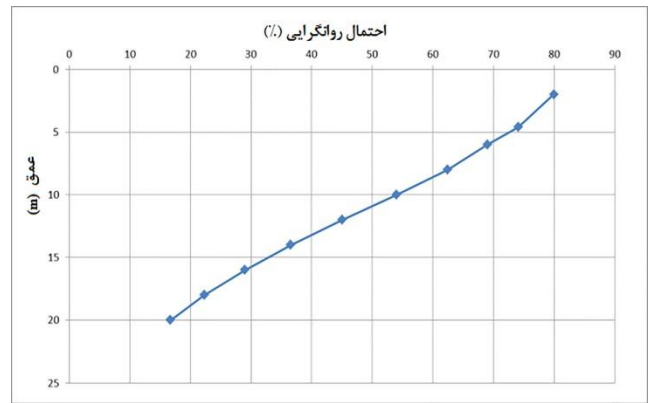
در این مقاله، عمق لایه خاک به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته شده و از عدم قطعیت‌های مربوط به آن صرف‌نظر شده است. در این بخش برای خاک مورد یک از موارد تاریخچه‌ای مندرج در جدول ۱ تحلیل‌هایی انجام گرفت که در آنها عمق لایه خاک از ۴/۶ متر مندرج در جدول ۱ تغییر یافته و سایر موارد ثابت نگه‌داشته شد. تحلیل‌ها برای اعماق ۲ تا ۲۰ متر انجام یافت. شکل ۱۱ تاثیر عمق بر تابع توزیع تجمعی احتمال CDF رسم شده برای خاک مورد یک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۱۱ مشخص می‌باشد، با افزایش عمق لایه منحنی CDF به سمت راست انتقال یافته و ضریب اطمینان افزایش و در نتیجه احتمال روانگرایی کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ تغییر احتمال روانگرایی با تغییر عمق لایه خاک را نشان می‌دهد. اگر طبقه‌بندی چن و جوانگ ۲۰۰۰ را در خصوص معیار $PL < 35\%$ به‌عنوان معیار عدم روانگرایی در نظر گرفته شود می‌توان بیان نمود 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.



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

rock slope stability. *Computers and Geotechnics*, 47, 42-47. doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.07.003

- [7] 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)
- [8] 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 ICORAGEE 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/10.1016/0145-7949(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 *3rd 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*



شکل ۱۲- تغییر احتمال روانگرایی با تغییر عمق

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج این پژوهش می توان گفت روش قطعی تعیین پتانسیل روانگرایی خاک، روش مطمئنی برای ارزیابی روانگرایی خاک نبوده و استفاده از روش تحلیل قابلیت اعتماد روانگرایی ابزار مناسبی را برای قضاوت مهندسی در اختیار متخصصین قرار می دهد.

با مقایسه ای که از نتایج حاصل از روش IHS با شبیه سازی MC انجام شد مشخص شد که روش IHS قابلیت تحلیل روانگرایی خاک را داشته و می تواند با هزینه محاسباتی کمتر نسبت به شبیه سازی MC نتایج دقیقی را ارائه نماید. از آنجایی که استفاده از شبیه سازی MC به عنوان روش معیاری در مطالعات روانگرایی رایج است می توان پیشنهاد نمود در آینده از روش IHS به جای شبیه سازی MC در مطالعات قابلیت اعتماد روانگرایی استفاده شود.

با انجام تحلیل حساسیت مبتنی بر ضریب تغییر پارامترهای موثر بر روانگرایی بر روی محدوده نسبتاً وسیعی از احتمال روانگرایی، مشخص شد بسته به شرایط ممکن است ضریب تغییر پارامترهای مختلف بیشترین تاثیر را بر احتمال روانگرایی داشته باشند در برخی موارد این تاثیر می تواند مقدار قابل ملاحظه ای باشد.

فهرست منابع:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Seed, H. B., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake Engineering Research institute*.
- [5] 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
- [6] Johari, A., Fazeli, A., & Javadi, A. A., 2013. An investigation into application of jointly distributed random variables method in reliability assessment of

geoenvironmental engineering, 12(4), 307-316.
doi.org/10.1061/(ASCE)1090-241(2000)12:4(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 9th 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

مجله علمی پژوهشی