

چکیده

در روش‌های محاسباتی تعیینی، اطلاعات ورودی همانند ضریب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، شیب شیروانی و سایر مشخصه‌ها به صورت مقادیر ثابت در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه تغییر مکان لرزه‌ای شیروانی‌ها تابعی از ضریب شتاب گسیختگی (k_y) و سایر پارامترهای مؤثر می‌باشد، با استفاده از تحلیل آماری می‌توان توزیع آماری و انحراف معیار k_y را محاسبه نمود. در این پژوهش، جهت بررسی تغییرات k_y مراحل زیر انجام می‌شود: تحلیل شبه‌استاتیکی شیروانی با پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی شیروانی، تعیین ارتباط بین ضریب شتاب گسیختگی شیروانی و سایر پارامترها با استفاده از روش برازش منحنی و روش الگوریتم ژنتیک (روش استراتژی تکاملی)، شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر بر k_y با توزیع آماری مشخص به روش مونت کارلو با استفاده از تولید اعداد تصادفی و در نهایت تعیین توزیع آماری و انحراف معیار ضریب شتاب گسیختگی شیروانی. در صورت انتخاب توزیع نرمال برای پارامترهای مؤثر بر k_y ، ضریب شتاب گسیختگی شیروانی دارای توزیع نرمال خواهد بود و ضریب تغییرات k_y ارتباط مستقیم با ضریب تغییرات پارامترهای مؤثر بر آن دارد. با افزایش میزان ضریب شتاب گسیختگی شیروانی، مقدار ضریب تغییرات آن کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ضریب شتاب گسیختگی، پایداری شیروانی، عدم قطعیت، شبیه‌سازی مونت کارلو، الگوریتم ژنتیک، استراتژی تکاملی

بررسی عدم قطعیت در تعیین ضریب شتاب گسیختگی شیروانی‌های خاکی

بهرام نادى (نویسنده مسؤل)

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و

تحقیقات تهران

Email: nadi@pci.iaun.ac.ir

فرج‌ا... عسکری

دانشیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی

زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

اورنگ فرزانه

استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه

تهران

1- مقدمه

زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌های رودبار در سال 1369 و نیز زلزله فیروزآباد کهجور در سال 1383 اشاره نمود. گسترش مناطق مسکونی در شهرها و ساخت‌وساز بر روی شیروانی‌ها، راهسازی در نواحی کوهستانی، و احداث خاکریزها، سدهای خاکی و ... نمونه‌هایی هستند که توجه خاص به ارزیابی پایداری لرزه‌ای شیب‌ها را در ایران ایجاب می‌نمایند.

تحلیل‌های پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها به دلیل ضرورت توجه به تنش‌های دینامیکی ایجاد شده توسط زلزله و تغییرات مقاومت خاک در شرایط لرزه‌ای، پیچیده می‌باشد. ناپایداری لرزه‌ای شیب‌ها می‌تواند ناشی از دو عامل افزایش نیروی اینرسی و یا کاهش مقاومت برشی خاک باشد [1]. در ناپایداری‌های ناشی از نیروی اینرسی، مقاومت برشی خاک نسبتاً ثابت مانده،

زمین‌لغزش ناشی از زلزله، سبب ایجاد خسارت‌های جانی و مالی زیادی گردیده است. پایداری شیروانی‌ها متأثر از عوامل زیادی است و ارزیابی کامل از پایداری مستلزم در نظر گرفتن اثر این عوامل می‌باشد. خصوصیات زمین‌شناختی، هیدرولوژیکی، توپوگرافیکی، هندسه شیب و نوع مصالح، همگی بر پایداری یک شیروانی اثر می‌گذارند. یک عامل بسیار مهم ناپایداری شیب‌ها وقوع زلزله می‌باشد. تاکنون لغزش شیروانی‌ها در اثر زلزله در پهنه‌های لرزه‌خیز موجب به وجود آمدن تلفات و خسارت‌های اقتصادی زیادی شده است. ارزیابی پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها در کشور ما به دلیل قرارگیری در یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان از اهمیت بالایی برخوردار است. در این میان می‌توان به خسارت‌های ایجاد شده بر اثر

برای یک پارامتر، از توابع توزیع احتمال¹ آن پارامتر استفاده می‌گردد. دو روش احتمالاتی که در مهندسی عمران و به خصوص ژئوتکنیک بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند روش شبیه‌سازی مونت کارلو² و مدل فضای تصادفی³ می‌باشد [3]. به سبب امکان انجام محاسبات سریع و وسیع عددی توسط کامپیوتر روش شبیه‌سازی اعداد همانند مونت کارلو جهت تحلیل پایداری شیروانی گسترش یافته است [4]. با فرض همگن و همسان بودن مصالح و عدم وجود آب زیرزمینی، نظر به اینکه ضریب شتاب گسیختگی شیروانی تابعی از زاویه شیب شیروانی β ، ارتفاع شیروانی h ، وزن مخصوص خاک γ ، ضریب چسبندگی خاک c و زاویه اصطکاک داخلی خاک ϕ می‌باشد، با استفاده از نتایج گسترده تحلیل تعادل حدی و به کارگیری روش‌های هوش مصنوعی همچون الگوریتم ژنتیک می‌توان به رابطه مشخصی⁴ بین پارامترهای فوق دست یافت [5-6]. تغییر در هر یک از پارامترهای فوق می‌تواند سبب تغییر در ضریب شتاب گسیختگی شیروانی شود. عدم قطعیت در محاسبه ضریب شتاب گسیختگی شیروانی را می‌توان بر اساس رابطه حاصل از الگوریتم ژنتیک و توابع توزیع احتمالی هریک از پارامترها حاصل از روش مونت کارلو بررسی نمود.

در این پژوهش جهت بررسی تغییرات k_y ، ابتدا با استفاده از تحلیل شبه استاتیکی شیروانی با پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی و هندسه شیروانی، ارتباط بین ضریب شتاب گسیختگی شیروانی و سایر پارامترها با استفاده از روش برازش منحنی و روش الگوریتم ژنتیک (روش استراتژی تکاملی) تعیین گردید، سپس با شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر بر k_y با توزیع آماری مشخص با استفاده از روش مونت کارلو و تولید اعداد تصادفی توزیع آماری و انحراف معیار، ضریب شتاب گسیختگی شیروانی محاسبه شد.

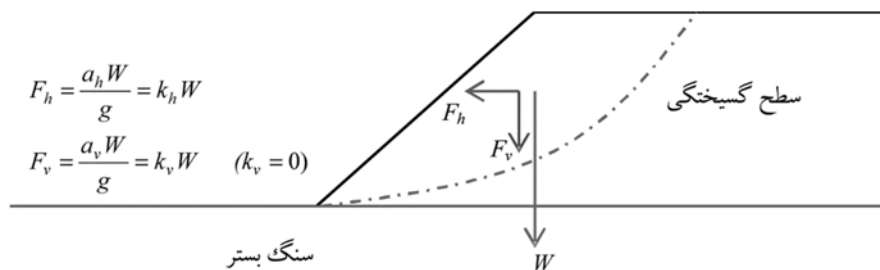
2- تحلیل پایداری لرزه‌ای شیروانی به روش شبه استاتیکی

شیروانی خاکی مطابق با هندسه شکل (1) که دارای زاویه مختلف شیب شیروانی و مصالح با خصوصیات مکانیکی و فیزیکی

لیکن تغییر شکل‌های شیروانی به وسیله تنش‌های دینامیکی زلزله که بزرگ‌تر از مقاومت خاک می‌باشند، گسترش می‌یابند. ناپایداری ناشی از کاهش مقاومت به گسیختگی‌هایی اطلاق می‌گردد که در آنها، مقاومت خاک در زمان وقوع زلزله کاهش می‌یابد و در نتیجه، شیروانی تحت تنش‌های تولید شده در اثر زلزله، پایدار باقی نمی‌ماند. در این تحقیق، ناپایداری‌های ناشی از اینرسی مد نظر می‌باشند و یا به عبارت دیگر مقاومت خاک در هنگام زلزله دچار کاهش نگردیده و ثابت فرض شده است. حرکات زلزله می‌توانند تنش‌های دینامیکی افقی و قائم درخور ملاحظه‌ای در شیروانی‌ها تولید نمایند که اضافه شدن آنها به تنش‌های استاتیکی موجود در توده خاک ممکن است به ناپایداری شیروانی منجر گردد.

روش‌های تحلیل پایداری شیروانی‌ها می‌تواند به صورت شبه استاتیکی، تنش - کرنش و یا روش تلفیقی ساده شده (بلوک لغزشی صلب نیومارک) باشد. در تحلیل شبه استاتیکی ضریب اطمینان لرزه‌ای شیروانی بسیار شبیه آنچه در تحلیل تعادل حدی استاتیکی صورت می‌گیرد، تعیین می‌شود. در روش تنش - کرنش، توده خاک به اجزاء محدود تقسیم‌بندی و با استفاده از روش‌های عددی تنش و کرنش ایجاد شده در توده خاک ناشی از نیروهای خارجی و داخلی محاسبه می‌گردد. این روش علیرغم دقت مناسب و مدل واقعی‌تر از عملکرد شیروانی، نیازمند تخصص ویژه و اطلاعات ورودی دقیق‌تری نیز می‌باشد. در روش بلوک لغزشی صلب نیومارک ابتدا آستانه تحمل لرزه‌ای شیروانی (ضریب شتاب گسیختگی شیروانی، k_y) به روش شبه استاتیکی تعیین و سپس تغییر مکان لرزه‌ای شیروانی در لحظاتی که شتاب وارده به شیروانی بیش از آستانه تحمل آن باشد محاسبه می‌گردد [2].

در روش تعیینی تنها یک مقدار مشخص همانند میانگین برای هر یک از پارامترها در نظر گرفته می‌شود در نتیجه نمی‌توان با استفاده از این روش تغییرات احتمالی یک پارامتر را در نظر گرفت. به عبارت دیگر روش‌های تعیینی عدم قطعیت مربوط به پارامترهای مؤثر بر طراحی را پوشش نمی‌دهند. در روش‌های احتمالاتی به جای استفاده از مقدار مشخص و ثابت



شکل (1): مشخصات هندسی مدل شیروانی

ژئواستودیو و به تبع آن تعداد زیاد نتایج خروجی، تفسیر نتایج آنها با دشواری همراه خواهد بود؛ لذا سعی بر آن شد که روش هوشمندی برای ارتباط ضریب شتاب گسیختگی شیروانی با سایر پارامترهای مؤثر به کار گرفته شود. جهت بررسی انحراف معیار ضریب اطمینان یافتن رابطه‌ای بین ضریب اطمینان و ϕ , β , k_v و $\frac{\gamma h}{c}$ ضروری می‌باشد. به‌عنوان یک روش مناسب جهت ارتباط روش‌های تعادل حدی و روش‌های عددی، استراتژی تکاملی، جهت یافتن رابطه‌ای مناسب برای بررسی پایداری شیب‌های خاکی مورد استفاده قرار گرفته است، این روش با داشتن مزایایی از جمله (سرعت، سادگی و دقت)، محدودیت‌های ارتباطی روش‌های تعادل حدی و روش‌های عددی را مرتفع کرده است، جدول (1).

روش استراتژی تکاملی از جمله روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی است که اساساً برای مسائل با متغیرهای پیوسته ارائه شده است. نتایج تحلیل شیروانی‌های خاکی که توسط نرم‌افزار ژئواستودیو مدل‌سازی شده و بر اساس روش‌های مختلف تحلیل گردیده بودند؛ با استفاده از الگوریتم استراتژی تکاملی مورد بررسی قرار گرفتند [7].

همان‌طور که توضیح داده شد استراتژی تکاملی به‌طور عمومی برای بهینه‌سازی مسائل پیوسته کاربرد دارد. در حالت کلی، یک فرد می‌تواند به‌صورت رابطه زیر تعریف شود:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_{n_{var}}, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n_{\sigma}}, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_{\alpha}}\} \quad (1)$$

که در آن x_i متغیر طراحی نام، σ_i تواتر تحول و α_i زاویه چرخش است، n_{var} تعداد متغیرهای طراحی و n_{σ} به‌طور معمول برابر 1 یا n_{var} در نظر گرفته می‌شود و n_{α} نیز از رابطه (2) محاسبه می‌گردد:

می‌باشد، تحت اثر ضرایب مختلف شتاب افقی زلزله قرار می‌گیرد و ضریب اطمینان شبه استاتیکی شیروانی محاسبه می‌شود. شیروانی مورد نظر به ارتفاع h ، زاویه شیب شیروانی β دارای مصالح همگن و همسان با وزن مخصوص γ ، ضریب چسبندگی c و زاویه اصطکاک داخلی ϕ واقع بر سنگ بستر در نظر گرفته شده است. اثر آب نیز می‌تواند در محاسبات لحاظ شود، لیکن در این پژوهش تأثیر آب مد نظر قرار نگرفته است.

ضریب اطمینان لرزه‌ای شیروانی فوق‌الذکر به چهار روش مختلف تحت اثر ضریب شتاب افقی 0/05، 0/1، 0/15، 0/2، 0/25، 0/3، 0/4، 0/5، 0/6، 0/7، 1/0 و 1/2، با زاویه شیروانی β برابر 35، 45 و 55 درجه، زاویه اصطکاک داخلی خاک ϕ برابر 10، 20، 30 و 40 درجه، پارامتر بدون بعد $\frac{\gamma h}{c}$ برابر 600، 120، 60، 40، 30، 24، 20، 17، 15، 13/33، 12، 10/9، 10، 7/5، 6، 5، 4، 3، 2 و 1 محاسبه گردید. محاسبات به روش لنگر اولیه، بیشاپ، جامبو و مورگنستن پرایس (تعادل نیرو و لنگر) از روش تعادل حدی و به کارگیری نرم‌افزار ژئواستودیو⁵ انجام شد. به‌طور مثال در جدول 1، ضریب اطمینان لرزه‌ای شیروانی به ازای مقادیر مختلف $\frac{\gamma h}{c}$ برای ضریب شتاب افقی 0/05، زاویه شیب شیروانی 35 درجه و خاک با زاویه اصطکاک داخلی 10 درجه ارائه گردیده است. با توجه به اعداد این جدول می‌توان ارتباط بین $\frac{\gamma h}{c}$ و FS را برای یک شیروانی مشخص تعیین نمود.

3- تعیین رابطه بین ضریب شتاب افقی، ضریب

اطمینان و سایر مشخصات شیروانی

با توجه به دامنه گسترده پارامترهای ورودی نرم‌افزار

جدول (1): محاسبه ضریب اطمینان لرزه‌ای شیروانی تحت اثر شتاب افقی 0/05 g

c (کیلو نیوتن بر متر مربع)	$\gamma h/c$	کیلونیوتن بر متر مکعب $g = 20$				
		روش اولیه تعادل لنگر	روش بیشاپ تعادل لنگر	روش جامبو تعادل نیرو	روش مورگنستن - پرایس	
					تعادل لنگر	تعادل نیرو
1	600	0/307	0/307	0/309	0/307	0/307
5	120	0/371	0/419	0/364	0/417	0/417
10	60	0/44	0/502	0/433	0/514	0/523
15	40	0/51	0/566	0/502	0/576	0/579
20	30	0/579	0/63	0/569	0/639	0/632
25	24	0/648	0/695	0/64	0/702	0/7
200	3	2/805	2/841	3/666	3/671	3/667
300	2	4/009	4/036	5/278	5/285	5/28
600	1	7/623	7/638	10/117	10/128	10/118

سایر مشخصات خاک و شیروانی، به صورت توابع اولیه مجزا با استفاده از روش رگرسیون و نتایج تحلیل حدی مشخص گردید. منظور از توابع اولیه، ارتباط ضریب شتاب گسیختگی به صورت تابع کسینوسی از β ، تابع سینوسی از ϕ ، تابع نمایی از FS و تابع درجه 6 از $m = \frac{c}{\gamma h}$ می‌باشد. رابطه اصلی بین ضریب شتاب افقی، ضریب اطمینان و سایر مشخصات خاک و شیروانی به صورت مجموعی از توابع اولیه فوق در نظر گرفته شد. در ادامه، ضرایب رابطه (4) با توجه به کمینه کردن تفاوت نتایج حاصل از رابطه اصلی با مقادیر k_h تعیین گردید. به عبارت دیگر در این بهینه‌سازی سعی بر این بوده تا بهترین ضرایب و درجه‌های مربوطه جهت پیدا کردن نزدیک‌ترین حالت بین k_h تعیین شده و محاسباتی مشخص شوند. لذا تابع هدف روند بهینه‌سازی به صورت رابطه (5) تعریف می‌گردد.

$$k_h = A \cos(\beta) + B \sin(\phi) + Cm^6 + Dm^5 + Em^4 + Fm^3 + Gm^2 + Hm + I(FS)^i + J(m^j) + \varepsilon \sigma_{k_h} \quad (4)$$

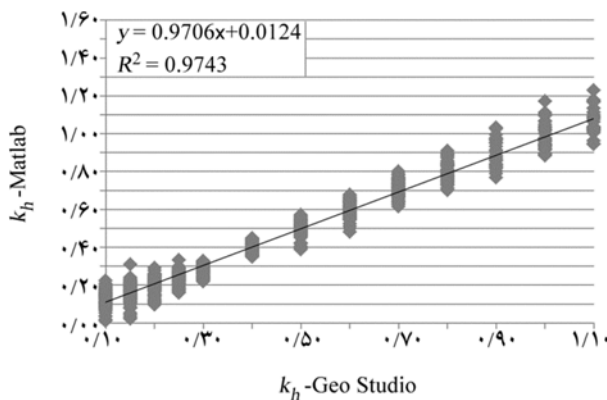
در رابطه‌ی فوق، σ_{k_h} انحراف معیار و $m = \frac{c}{\gamma h}$ می‌باشد. در صورتی که $\varepsilon = 0$ انتخاب شود، مقدار k_h حاصله برابر مقدار

$$n_{\alpha} = \left(n_{\text{var}} - \frac{n_{\sigma}}{2} \right) (n_{\sigma} - 1) \quad (2)$$

یکی از عملگرهایی که در استراتژی تکاملی به کار گرفته شده عملگر ترکیب است که به کمک آن از تعداد p والد، یک والد ثانویه تولید می‌شود، جواب حاصله پس از اعمال عملگر تحول فرزندان را تولید می‌کند. در صورتی که تعداد λ والد ثانویه نیاز باشد عملگر ترکیب λ بار انجام می‌گردد. در صورتی که تعداد والد برابر 2 باشد ترکیب را موضعی و اگر بیش از 2 باشد ترکیب را کلی می‌نامند. در استراتژی تکاملی، ترکیب گسسته مورد استفاده قرار گرفته است. در این ترکیب مطابق رابطه‌ی (3)، متغیر طراحی i ام والد ثانویه از مجموعه متغیرهای طراحی i ام، p والد به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. قابل ذکر است که والدها خود نیز به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. واضح است که این عملگر مشابه عملگر متقاطع در الگوریتم ژنتیک است [8].

$$x'_i \in \{x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(p)}\} \quad (3)$$

p تعداد والدهای دخیل در تولید والد ثانویه است. رابطه مناسب بین ضریب شتاب افقی، ضریب اطمینان و



شکل (2): مقایسه میان مقادیر ضریب شتاب افقی تعیین شده از دو روش استراتژی تکاملی و تعادل حدی انجام شده توسط نرم‌افزار ژئو استودیو

4- تعیین انحراف معیار ضریب شتاب گسیختگی شیروانی به روش شبیه‌سازی

منظور از شبیه‌سازی، ایجاد محیطی ساختگی و استفاده از یک مدل نظری، برای تخمین رفتار واقعی یک سامانه یا سیستم و روش‌های شبیه‌سازی تابعی از هدف و محدودیت‌های به کارگیری آن می‌باشد. در این پژوهش، روش شبیه‌سازی مولد (نمونه‌سازی) به کار گرفته شده است [9].

روند عملکرد روش شبیه‌سازی مونت کارلو به صورت زیر است:

1- یک مدل تعیینی⁶ به عنوان راه‌حل مناسبی برای حل مسئله مورد نظر ارائه می‌شود. رابطه (6) ارتباط بین ϕ ، β ، k_y و $m = \frac{c}{\gamma h}$ را مشخص می‌نماید.

2- متغیرهای تصادفی و تابع چگالی احتمال مناسب آنها، شامل مشخصات خاک و هندسه شیروانی انتخاب می‌گردد. در رابطه ϕ ، β ، k_y متغیر وابسته و $m = \frac{c}{\gamma h}$ متغیرهای مستقل با مقادیر مثبت و میانگین‌های $\bar{\phi}$ ، $\bar{\beta}$ و \bar{m} توزیع احتمال مشخص و واریانس σ^2 است. در این حالت به منظور بررسی k_y باید مقادیر ϕ ، β و $m = \frac{c}{\gamma h}$ شبیه‌سازی شوند [10]. در روش مونت کارلو، متغیرهای مستقل همانند ضریب چسبندگی خاک با توزیع آماری مشخص به شیوه اعداد تصادفی شبیه‌سازی می‌گردد. برای انجام این عمل، نیاز به یک تابع برای ساخت اعداد تصادفی می‌باشد که با استفاده از

میانگین (احتمال 50 درصد) و در صورتی که $\varepsilon = 1$ انتخاب شود، مقدار k_h حاصله برابر مقدار میانگین به اضافه انحراف معیار (احتمال 84/1 درصد) خواهد بود.

$$\min f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_{h_i}^{ex} - k_{h_i}^{est})^2 \quad (5)$$

در روابط فوق، $k_{h_i}^{est}$ مقادیر ضریب زلزله تخمین شده توسط الگوریتم ژنتیک و $k_{h_i}^{ex}$ مقادیر ضریب زلزله محاسبه شده به روش تعادل حدی می‌باشد.

با اتمام فرآیند بهینه‌سازی و همگرا شدن الگوریتم به جواب بهینه‌ی مطلق، ضرایب بهینه‌ی رابطه (4) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} A &= 0.808581 & B &= 0.970798 \\ C &= -19.310825 & D &= -0.613696 \\ E &= 7.996133 & F &= -4.092598 \\ G &= -6.6743768 & H &= 5.1921828 \\ I &= -1.0750048 & i &= 0.625328 \\ J &= 10.800073 & j &= 3.822072 \\ \sigma_{k_h} &= 0.038 \end{aligned}$$

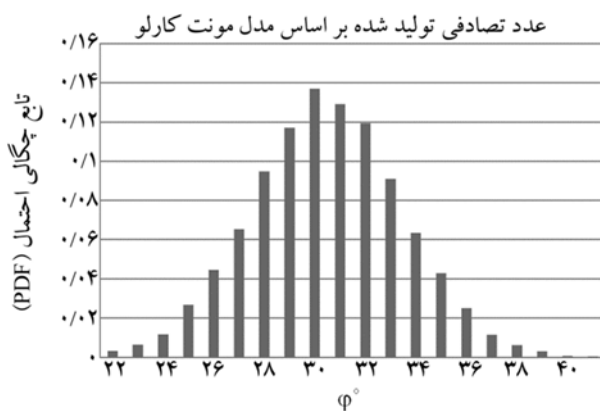
جواب‌های حاصل از رابطه (4) برای تخمین ضریب شتاب افقی زلزله با نتایج حاصل از تحلیل حدی، برای بازه‌ی $FS \in [0.75, 1.5]$ ، نزدیکی و همبستگی کلی مناسبی را با توجه به شکل (2) نشان می‌دهند. در صورتی که ضریب اطمینان برابر 1 فرض شود ضریب شتاب گسیختگی شیروانی از رابطه (6) تعیین می‌شود.

$$k_y = k_h = A \cos(\beta) + \beta \sin(\phi) + Cm^6 + Dm^5 + Em^4 + Fm^3 + Gm^2 + Hm + I + J(m^j) + \varepsilon \sigma_{k_h} \quad (6)$$

در این حالت مقادیر ضرایب در روابط (4) و (6) یکسان خواهند بود.

در شکل (2) مقادیر ضریب شتاب افقی تعیین شده از دو روش استراتژی تکاملی با استفاده از برنامه MATLAB و تعادل حدی انجام شده توسط نرم‌افزار ژئو استودیو نشان داده شده است که دارای همبستگی مناسب 0/9743 و انحراف معیار 0/038 می‌باشند.

پارامترها [12، 14]، با فرض β با میانگین 35 درجه و ضریب تغییرات (نسبت انحراف معیار به میانگین) 1 درصد، φ برابر 30 درجه و ضریب تغییرات 2 درصد [12-14]، γ با میانگین 20 کیلو نیوتن بر متر مکعب و ضریب تغییرات 3 درصد [12-16]، ارتفاع شیروانی برابر 30 متر و ضریب تغییرات 1 درصد و ضریب چسبندگی برابر 13/33 کیلو نیوتن بر متر مربع و ضریب تغییرات 5 درصد [12-16]، مقدار میانگین ضریب شتاب گسیختگی شیروانی برابر 0/181 و ضریب تغییرات آن برابر 6/12 درصد محاسبه گردیده است. با توجه به روش تعادل حدی مقدار میانگین ضریب شتاب گسیختگی شیروانی با روش بیشاپ برابر 0/176 می‌باشد. شکل (3) توزیع نرمال زاویه اصطکاک داخلی خاک شبیه‌سازی شده به روش مونت کارلو را نشان می‌دهد.



شکل (3): توزیع نرمال زاویه اصطکاک داخلی خاک شبیه‌سازی شده به روش مونت کارلو

4- با استفاده از اعداد شبیه‌سازی شده برای تمامی پارامترهای مستقل و مدل تعیینی تعریف شده، رابطه (6)، مقدار ضریب شتاب گسیختگی شیروانی و تابع چگالی احتمال آن محاسبه گردید. با انتخاب وزن مخصوص خاک در محدوده 17 تا 20 کیلو نیوتن بر متر مکعب و ضریب تغییرات 3 تا 7 درصد، زاویه اصطکاک داخلی خاک در محدوده 10 تا 40 درجه و ضریب تغییرات 2 تا 13 درصد، ضریب چسبندگی خاک در محدوده 1 تا 600 کیلو نیوتن بر متر مربع و ضریب تغییرات

این تابع، اعداد تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت با مقدار میانگین صفر و انحراف معیار 1 ایجاد می‌شوند و برای تبدیل این اعداد به اعدادی با توزیع نرمال از رابطه انتقال (رابطه 7) استفاده می‌شود، به گونه‌ای که در هر مرحله ابتدا دو عدد با توزیع یکنواخت تولید و سپس با استفاده از رابطه انتقال به یک عدد با توزیع نرمال تبدیل می‌گردند. این رابطه در سال 1958 توسط آقای بوکس و مولر [11] ارائه شد.

$$N = \sqrt{-2 \ln r_1} \sin(2\pi r_2) \quad (7)$$

در این رابطه N عدد تصادفی نرمالایز شده، r_1 عدد تصادفی اول با توزیع یکنواخت و r_2 عدد تصادفی دوم با توزیع یکنواخت می‌باشند. پس از مشخص شدن مقدار N پارامترهای ورودی با استفاده از رابطه (8) ایجاد می‌شوند. بر اساس این رابطه اعدادی (P) با میانگین μ ، انحراف معیار σ و توزیع نرمال ساخته می‌شوند.

$$P = \mu + N\sigma \quad (8)$$

هرچه چرخه‌های انجام آنالیز با روش مونت کارلو افزایش یابد دقت محاسبات نیز افزایش می‌یابد. تعداد چرخه‌های انجام شده در روش مونت کارلو می‌تواند از حدود 40 تا 10^{10} انتخاب گردد. انتخاب این تعداد بستگی به میزان دقت مورد نیاز، تعداد متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و اندازه انحراف معیار مورد نظر دارد. معمولاً در کارهای مهندسی تعداد چرخه مورد نیاز مضربی از هزار می‌باشند. رابطه (9) برای تعیین تعداد چرخه‌های مورد نیاز در انجام آنالیز مونت کارلو ارائه می‌شود [12].

$$N_{mc} = \left[\frac{\sigma^2}{4(1-\delta)^2} \right]^m \quad (9)$$

در رابطه بالا N_{mc} تعداد چرخه‌های مورد نظر در انجام محاسبات مونت کارلو، σ اندازه انحراف معیار، δ میزان دقت مورد نیاز و m تعداد متغیرهای تصادفی می‌باشد.

3- با در نظر گرفتن تابع چگالی و وابستگی پارامترها به یکدیگر، پارامترهای ورودی ایجاد می‌گردند. به‌طور مثال، بر مبنای رابطه (6) و در نظر گرفتن توزیع نرمال برای تمامی

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جهت بررسی تغییرات k_y ابتدا با استفاده از تحلیل شبه استاتیکی شیروانی با پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی و هندسه شیروانی، ارتباط بین ضریب شتاب گسیختگی شیروانی و سایر پارامترها با استفاده از روش برازش منحنی و روش الگوریتم ژنتیک (روش استراتژی تکاملی) تعیین گردید. سپس با شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر بر k_y با توزیع آماری مشخص با استفاده از روش مونت کارلو و تولید اعداد تصادفی توزیع آماری و انحراف معیار ضریب شتاب گسیختگی شیروانی تعیین و نتایج زیر حاصل گردید:

- در صورت انتخاب توزیع نرمال برای پارامترهای مؤثر بر k_y ، ضریب شتاب گسیختگی شیروانی دارای توزیع نرمال خواهد بود.

- ضریب تغییرات k_y ارتباط مستقیم با ضریب تغییرات پارامترهای مؤثر بر آن دارد. با افزایش میزان ضریب شتاب گسیختگی شیروانی، مقدار ضریب تغییرات آن کاهش می‌یابد. - محدوده ضریب تغییرات ضریب شتاب گسیختگی شیروانی با مد نظر قرار دادن حداقل مقادیر ضریب تغییر برای پارامترهای مؤثر 5 تا 11 درصد می‌باشد.

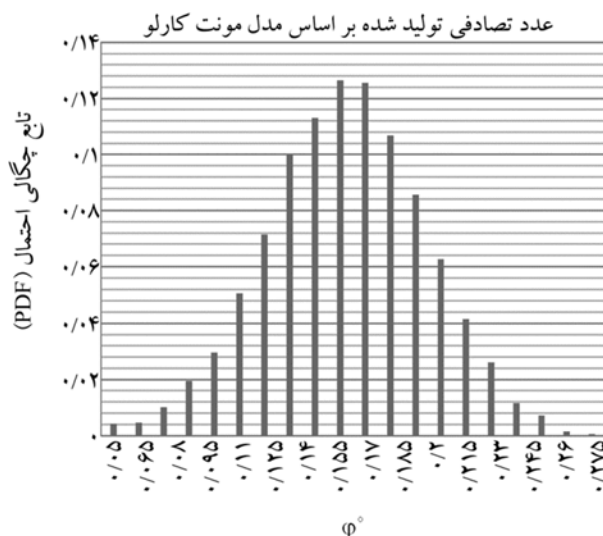
- محدوده ضریب تغییرات ضریب شتاب گسیختگی شیروانی با مد نظر قرار دادن حداکثر مقادیر ضریب تغییر برای پارامترهای مؤثر 25 تا 59 درصد محاسبه گردید.

- با افزایش ضریب شتاب گسیختگی شیروانی از 0/1 به 0/35، ضریب تغییر (COV%) آن با مد نظر قرار دادن حداقل مقادیر ضریب تغییر برای پارامترهای مؤثر بر آن، از 11 درصد به 5 درصد کاهش می‌یابد.

- با افزایش ضریب شتاب گسیختگی شیروانی از 0/1 به 0/35، ضریب تغییر (COV%) آن با مد نظر قرار دادن حداکثر مقادیر ضریب تغییر برای پارامترهای مؤثر بر آن، از 59 درصد به 25 درصد کاهش می‌یابد.

- ضریب تغییرات (COV%) با فرض تغییر یکسان و یکنواخت مشخصات یک لایه خاک محاسبه گردیده است و

5 تا 20 درصد و ضریب تغییرات زاویه شیب شیروانی و ارتفاع شیروانی برابر 1 درصد و با فرض توزیع نرمال برای تمامی مقادیر متغیرهای تصادفی، ضریب تغییرات k_y با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه گردید. تعداد اعداد تصادفی شبیه‌سازی برای هر متغیر برابر 110000 عدد در نظر گرفته شد. با فرض توزیع نرمال برای تمامی پارامترها و شبیه‌سازی پارامترهای ورودی به روش مونت کارلو، تابع توزیع ضریب شتاب گسیختگی شیروانی مطابق شکل (4) به صورت نرمال تعیین گردید. ضریب تغییرات k_y با افزایش مقدار میانگین آن، کاهش می‌یابد. جدول (2) ضریب تغییرات k_y را با فرضیات فوق نشان می‌دهد.



شکل (4): توزیع نرمال ضریب شتاب گسیختگی شیروانی حاصل از روش شبیه‌سازی مونت کارلو

جدول (2): ضریب تغییرات ضریب شتاب گسیختگی شیروانی

ضریب تغییرات (COV%)	دامنه تغییر ضریب شتاب گسیختگی شیروانی
11 تا 59 درصد	0/1 تا 0/15
7 تا 41 درصد	0/2 تا 0/15
5 تا 31 درصد	0/25 تا 0/2
5 تا 26 درصد	0/3 تا 0/25
5 تا 25 درصد	0/35 تا 0/3

- Z.I. (2014) Why the Monte Carlo method is so important today. *WIREs Comput. Stat.*, **6**, 386-392.
10. US Army Corps of Engineers (US ACE) (1997) *Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering*. No 1110-2-547.
11. Box, G.E.P. and Muller, M.E. (1958) A note on the generation of random normal deviates. *The Annals of Mathematical Statistics*, **29**(2), 610-611.
12. Harr, M.E. (1987) *Reliability Based Design in Civil Engineering*. New York, Dover Publications INC.
13. Kulhawy, F.H. (1992) On the evaluation of soil properties. *Geotech. Spec. Publ.* **31**, ASCE, 95-115.
14. Jones, A.L., Kramer, S.L., and Arduino, P. (2002) *Estimation of Uncertainty in Geotechnical Properties for Performance-Based Earthquake Engineering*. Pacific Earthquake Engineering Research, PEER 2002/16.
15. Lacasse, S. and Nadim, F. (1997) *Uncertainties in Characterizing Soil Properties*. Publ. No. 201, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 49-75.
16. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996) Uncertainties in characterizing soil properties uncertainty in the geologic environment, from theory to practice. *Proceeding of Uncertainty Geotechnical Special Publication*, No. 58.

اصطلاحات فنی

- Probability Density Function 1- توابع توزیع احتمال
- Monte Carlo Simulation 2- شبیه‌ساز مونت کارلو
- Stochastic Model 3- مدل فضای تصادفی
- Closed Form 4- رابطه مشخص
- Geo Studio 5- نرم‌افزار ژئواستودیو
- Deterministic Model 6- مدل تعیینی
- Stochastic Finite Elements 7- اجزاء محدود تصادفی
- Stochastic Finite Difference 8- اختلاف محدود تصادفی

در صورتی که مشخصات یک لایه از خاک در نقاط مختلف به صورت غیر یکنواخت تغییر یابد نیاز به تحلیل با روش اجزاء محدود تصادفی⁷ و یا روش اختلاف محدود تصادفی⁸ می‌باشد که در این حالت احتمال کاهش ضریب تغییر k_y وجود دارد.

مراجع

1. Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA.
2. Jibson, R.W. (2011) Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes - A retrospective. *Engineering Geology*, **122**(1-2), 43-50.
3. Jiang, S., Li, D., Cao, Z., Zhou, C., and Phoon, K. (2015) Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using monte carlo simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **141**(2), 04014096.
4. Ozelim, L., Cavalcante, L., Assis, A., and Ribeiro, L. (2015) Analytical slope stability analysis based on statistical characterization of soil primary properties. *International Journal of Geomechanics*, **15**(2), 06014018.
5. Manouchehrian, A., Gholamnejad, J., and Sharifzadeh, M. (2014) Development of a model for analysis of slope stability for circular mode failure using genetic algorithm. *Environmental Earth Sciences*, **71**(3), 1267-1277.
6. Piña, R. and Jimenez, R. (2015) A genetic algorithm for slope stability analyses with concave slip surfaces using custom operators. *Engineering Optimization*, **47**(4), 453-472.
7. Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-Shafie, A., and Eslami, M. (2012) A modified gravitational search algorithm for slope stability analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **25**(8), 1589-1597.
8. Hornby, G.S. and Pollack, J.B. (2002) Creating high-level components with a generative representation for body-brain evolution. *Artificial Life*, **8**(3), 223-246.
9. Kroese, D.P., Brereton, T., Taimre, T., and Botev,

Uncertainty in Determination of Seismic Yield Coefficient of Earth Slopes

Bahram Nadi¹, Faradjollah Askari², and Orang Farzaneh³

1. Ph.D. Candidate, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, email: Corresponding Author, e-mail: nadi@pci.iaun.ac.ir
2. Associate Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, University of Tehran, Iran

The landslides occurred due to an earthquake have ever caused great losses of life and property. Earth slope stability is influenced by many factors that should be taken into account for a comprehensive assessment of it. However, slope seismic analyses are complicated due to the necessity of concerning the dynamic stresses caused by an earthquake and the soil resistance changes in seismic conditions. Seismic slope instability can arise from two significant factors including the increase of inertia forces and the decrease of soil shear strength. Moreover, the earthquake motions can produce considerable dynamic shear and vertical stresses in earth slopes. If these stresses are added to the static stresses existing in the soil mass, they may lead to slope instability [1].

The methods of analyzing the earth slopes stability can be pseudo-static and stress-strain analyses or simplified integration method (Newmark rigid-block method). In the pseudo-static analysis, slope seismic safety factor is determined in a very similar way as what is done in static equilibrium analysis. In the stress-strain analysis, first of all, soil mass is divided into the finite elements. Afterwards, by using numerical methods, the stresses and strains caused by external and internal forces in soil mass is calculated. Although this method is accurate and gives a realistic model of the earth slopes, it requires the special expertise and precise input information. The rigid-block model assumes that permanent deformation initiates when the earthquake-induced accelerations acting on a slide mass exceed the yield resistance on the slip surface. The resistance is quantified by the seismic yield coefficient (k_y). At this point, the slide mass breaks away from the rest of the underlying slope and sliding occurs at a constant rate of acceleration equal to k_y . During this time, the velocity of the ground is greater than the velocity of the slide mass. Sliding continues until the following conditions are met: (1) accelerations fall below k_y , and (2) velocity of the slide mass and the underlying ground coincide [2].

In deterministic computation methods, input data such as viscosity, inner friction angle, inclination of slope, etc. is considered as fixed values; therefore, by using these methods, the probabilistic variation of a parameter cannot be considered. In other words, deterministic methods do not include the uncertainty related to the effective design parameters.

In the probabilistic method, instead of using a fixed value for a parameter, the probability distribution function (Probability Density Function) of it is used. Due to the possibility of performing fast extensive numerical calculations by computer, the numerical simulation methods such as Monte Carlo simulation have been employed in slope stability analysis. Assuming homogeneity of materials, along with, absence of underground water on one hand, and considering that the slope seismic yield coefficient is a function of the angle of slope β , height of slope h , soil bulk density γ , the coefficient of soil cohesion c and internal friction angle ϕ , on the other hand, a closed-form relationship between the above-mentioned parameters can be achieved using the extensive results of limit equilibrium analysis and artificial intelligence methods such as genetic algorithm [4]. Any change in each of the stated parameters can lead to a change in slope seismic yield coefficient. The uncertainty in calculation of slope seismic yield coefficient can be taken into account by utilizing genetic algorithm and probability distribution functions of input parameters.

Due to the fact that coseismic slope deformation is a function of seismic yield coefficient (k_y) and other effective parameters, using the statistical analysis, the statistical distribution and the standard deviation of k_y can be assessed. In the present study, the following steps were taken for studying the variation of k_y : Implementing a pseudo-static analysis of earth slopes having various physical and mechanical parameters, determining the relationship between slope seismic yield coefficient and other given parameters using curve fitting and genetic algorithm method (evolutionary strategy method), simulating the effective parameters on k_y by means of Monte Carlo method based on a specified statistical distribution [9]. The Monte Carlo simulation procedure is as follows:

- Providing a deterministic model for solving the problem.
- Selecting the random variables including soil characteristics, slope geometry and proper probability density functions.
- Generating the input parameters by taking into account the density functions and random variables dependency (parameters' dependency) to each other.
- Using simulated numbers related to all independent parameters, along with defined deterministic model, the value of slope seismic yield coefficient and probability density function of it are obtained. Consequently, the following results were concluded:
 1. If normal distribution is selected for the parameters affecting k_y , slope seismic yield coefficient will be normally distributed.
 2. The coefficient of variation of k_y has a direct relationship with coefficient of variation of parameters affecting it. If slope seismic yield coefficient is increased, the acceleration coefficient will be decreased.
 3. With selecting the minimum amount of coefficient of variation for effective factors, the range of coefficient of variation of slope seismic yield coefficient is between 5 and 11 percent.
 4. With considering the maximum amount of coefficient of variation for effective factors, the range of coefficient of variation of slope seismic yield coefficient is between 25 and 59 percent.
 5. With taking into consideration the minimum amounts of the coefficient of variation for effective parameters, and increasing mean value of slope yield acceleration from 0.1 to 0.35, its variation coefficient (COV%) decreases from 11 percent to 5 percent.
 6. With taking into account the maximum values of the coefficient of variation for the effective parameters, and increasing mean value of slope yield acceleration from 0.1 to 0.35, its variation coefficient (COV%) decreases from 59 percent to 25 percent.

In this study, coefficient of variation of k_y is calculated assuming that the properties of a soil layer changes similarly in all points of it. If these properties vary from point to point, there is a need to employ random field method (stochastic finite element) in order to simulate the spatial variation of soil properties.

Keywords: Seismic Yield Coefficient; Monte Carlo Simulation; Slope Stability; Genetic Algorithm; Revolutionary Algorithm; Uncertainty.