



روش ساده احتمالاتی مونت کارلو در تحلیل پایداری شیبها جهت آنالیز حساسیت از طریق تعیین ضریب تغییرات پارامترها

علی سنایی راد^۱، مهدی کوکلانی فر^۲

۱- استادیار بخش عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دبیر کمیته فنی، طرح و توسعه، شرکت آب منطقه ای آذربایجان غربی

تلفن همراه: ۰۹۱۴۳۴۰۳۰۴۲، آدرس پست الکترونیکی: mehdi1_msc@yahoo.com

خلاصه

علیرغم نامعینی های موجود در مسائل تحلیل شیروانی ها و با وجود مزایای استفاده از تحلیل احتمالاتی اعتراف می کنیم که بکار گیری چنین تکنیک هایی کم می باشد. یکی از روش های احتمالاتی شبیه سازی مونت کارلو می باشد که در تحلیل پایداری شیبها کاربرد دارد در این تحقیق یک شیروانی باهندسه مشخص و پارامترهای ورودی با توزیع نرمال معرفی گشته و با در نظر گرفتن روشهای متداول تعادل حدی تحلیل احتمالاتی مونت کارلو انجام و آنالیز حساسیت روی تک تک پارامترها تنها از طریق بررسی ضریب تغییرات آنها انجام می شود. همچنین تاثیر عدم قطعیت هر پارامتر روی نتیجه نهایی بدست می آید نتیجه مهمی که از آن برداشت می شود این است که ضریب اطمینان نسبت به پراکندگی پارامتر ϕ بسیار حساس تر از C, γ میباشد ولی این نتیجه همیشه صادق نیست زیرا هنگامی که میانگین مقدار ϕ (درجه) از لحاظ عددی نسبت به C (kpa) خیلی کوچکتر باشد به تبع آن ضریب تغییرات هر چه بزرگ هم باشد اثرات پراکندگی C بیشتر خواهد بود اما در شرایطی که این پارامترها به لحاظ نسبی اختلاف کمی داشته باشند اثرات پراکندگی ϕ بیشتر می باشد و نیز مشخص می شود که با افزایش شیب شیروانی که احتمال گسیختگی نیز افزایش پیدا می کند تغییرات ϕ در پراکندگی FOS تاثیر کمتری نسبت به حالتی که شیب ملایمتر است خواهد داشت در حالی که برای دو پارامتر C, γ قضیه بر عکس می باشد. با فرض اینکه پارامترهای مقاومتی وابسته یا غیر وابسته هستند مشخص می گردد که تحلیل احتمالاتی متاثر از این فرض بوده و با وجود اینکه میانگین مقدار ضریب اطمینان مربوط به توزیع نرمال در هر دوی آنها اختلاف ناچیزی دارند ولی در حالت پارامترهای مقاومتی غیر وابسته، انحراف از معیاری که برای توزیع نرمال ضرایب اطمینان محاسبه می شود تقریباً ۱/۶ برابر انحراف از معیار مربوط به تحلیل احتمالاتی با ضریب همبستگی ۰/۷- می باشد، بنابراین اگر به درستی بنا به تحقیقات انجام یافته وابستگی پارامترهای مقاومتی وجود داشته باشد فرض غیر وابستگی پارامترها احتمال گسیختگی را افزایش می دهد

کلمات کلیدی: پایداری شیروانی ها، تحلیل احتمالاتی، مونت کارلو، تاثیر پارامترها

مقدمه

براساس تعریف ترزاقی و پک (۱۹۶۷)، لغزشها به هر شکل قابل تصویری، آهسته یا ناگهانی و با هر عامل محرکی می توانند اتفاق بیافتند. گسیختگی شیبها معمولاً ناشی از هر گونه عامل کاهش تدریجی یا ناگهانی مقاومت خاک یا تغییری در شرایط هندسی روی می دهد. به طور کلی می توان شیروانی ها را به دو دسته شیروانی های طبیعی و شیروانی های طراحی شده، دسته بندی کرد. [1]

بررسی شیروانی های خاکی یکی از مسائل اصلی مهندسی ژئوتکنیک بوده است. سدهای خاکی، گودبرداری ها، ترانشه ها و ... سازه های خاکی محسوب می شوند که از نظر اهمیت در درجه بالایی حتی برای تمدن بشری قرار دارند. بنابراین تحلیل، طراحی و رفتار نگاری این سازه ها در طول زمان مد نظر مهندسان بوده است به طوری که قدمت بررسی شیروانیهای خاکی حتی از قدمت علم ژئوتکنیک نیز بیشتر است.

در بررسی پایداری شیروانی ها، معمول است که نیروهای محرک و مقاوم محاسبه گردیده و بزرگی آنها نسبت به هم سنجیده شود با دقت در تک عوامل موثر در این محاسبات، متوجه می شویم که تعیین یک مقدار عددی مشخص و دقیق برای آنها غیر ممکن است چرا که اولاً این پارامترها معمولاً

^۱ عضو هیئت علمی دانشگاه اراک

^۲ دبیر کمیته فنی شرکت سهامی آب منطقه ای آذربایجان غربی و مدرس دانشگاه غیر انتفاعی علم و فن ارومیه



در فضای محاسبات ثابت نیستند، ثانیاً اندازه گیری ما از آنها همراه با خطا می باشد. بهمین دلیل می توان گفت این پارامترها قطعی و دقیق نبوده و همراه با تغییر و نامعینی و به بیان دیگر احتمالاتی می باشند. بنا براین اگر برای هر کدام از آنها با توجه به میزان عدم قطعیت، توزیع احتمالاتی تعریف شود، نهایتاً تمامی این نامعینی ها در نتیجه خروجی نیز منعکس شده و بجای ضریب اطمینان یک توزیع احتمالاتی بدست می آید.[2]

دلایل عدم استفاده از تحلیل های احتمالاتی

علیرغم نامعینی های موجود در مسائل تحلیل شیب و با وجود مزایای استفاده از تحلیل احتمالاتی اعتراف می کنیم که بکار گیری چنین تکنیک هایی کم می باشد. بی توجهی در استفاده از روش های احتمالاتی توسط مهندسان تجربی شامل چهار عامل ذیل می باشد:

۱. در طی دوران آموزش کنونی دروس آمار و احتمالات برای مهندسان در حد اطلاعات پایه ارائه می گردد در نتیجه آنها بجای اینکه خود را با احتمالات درگیر کنند در تحلیل پایداری ضریب اطمینان را تعیین می کنند.
۲. یک تصور عمومی غلط وجود دارد که تحلیل احتمالاتی نیازمند اطلاعات زیاد و زمان طولانی بوده و سخت تر از روش قطعی است.
۳. مراجع مطالعاتی کمی بصورت کاربردی درباره انجام و مزیت های روش تحلیل احتمالاتی انتشار یافته است.
۴. چگونگی اینکه اگر در تحلیل احتمالاتی شرایط نامطلوب پایداری وجود آید یا به عبارتی احتمال گسیختگی وجود داشت بدرستی تعریف نگردیده است و در واقع رابطه ای بین ارزیابی احتمال وقوع شرایط نامطلوب و ارزیابی متداول روش قطعی وجود ندارد این عامل باعث شده که نتایج تحلیل احتمالاتی قابل فهم نباشد.

تعریف مسئله و اهداف تحقیق

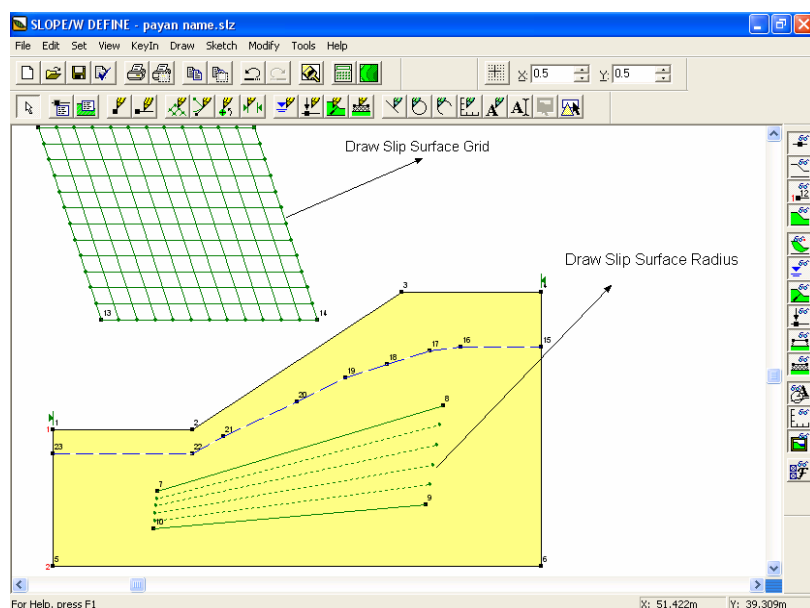
جهت بررسی اثر پراکندگی داده های ورودی در تحلیل احتمالاتی و تاثیر در نظر گرفتن وابستگی و عدم وابستگی پارامترهای مقاومتی خاک در نتیجه تحلیل احتمالاتی، مطابق شکل (۱) با استفاده از نرم افزار slope/w از نرم افزار slope/w یک شیروانی با هندسه مشخص (شیب 1.0V:1.5H و ارتفاع ۲۰ متر) مدل گردید و فشار آب حفره ای نیز با تعیین سطح فراتیک آب به برنامه معرفی و پارامترهای خاک با میانگین مقادیر ثابت به قرار زیر تعیین شدند:[4]

$$\text{Unit weight} = 2000 \text{ (kg / m}^2\text{)}$$

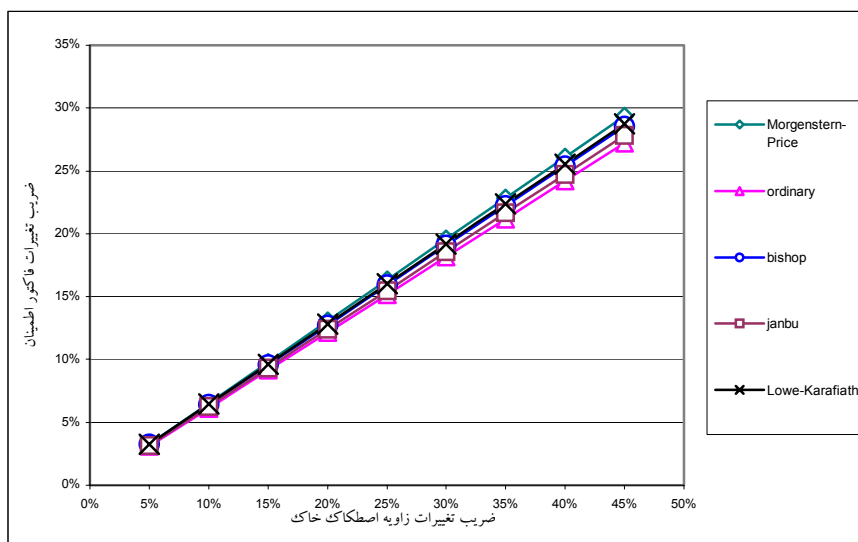
$$\text{Cohesion} = 1700 \text{ (kg / m}^2\text{)}$$

$$\phi = 20^\circ$$

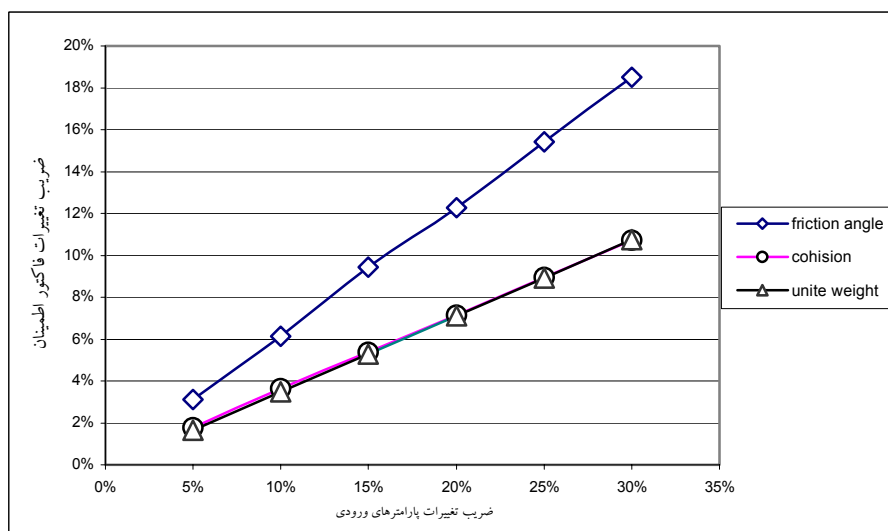
و نیز با توجه به اینکه اکثر این پارامترها دارای توزیع نرمال می باشند (مگر اینکه خلاف آن ثابت شود)[3]، برای پارامترهای خاک توزیع نرمال در نظر گرفته شد و در بخش تاثیر پراکندگی پارامترهای ورودی، پارامترهای مقاومتی، غیر وابسته فرض شدند و در حالات مختلف تحلیل، میانگین ها ثابت بوده و ضریب تغییرات توزیع برای پارامترها اعداد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳ (lumb(1966) در نظر گرفته شد و تحلیل با استفاده از روش های تعادل حدی معمولی، یابوی ساده شده، بیشاپ ساده شده، مورگنسترن پرایس و روش لو کرافیس انجام گردید. [2]، تا بدینوسیله اثر پراکندگی و میزان تاثیر پراکندگی هر پارامتر با وجود ثابت(قطعی) بودن دیگر پارامترها در روش های مذکور تعادل حدی مطالعه گردد در هر حالت، عملیات شبیه سازی مونت کارلو ۴ الی ۵ بار انجام و تعداد نمونه گیری تصادفی از توزیع نرمال برای پارامتر ورودی ۱۰۰۰۰ بار به برنامه معرفی گردید، تا تکرار پذیری محاسبات و میزان تغییرات قابل مشاهده و نتیجه گیری باشد.



شکل(۱): صفحه نمایش از مدل مورد تحلیل احتمالاتی



شکل (۲): نمودار اثر پراکندگی زاویه اصطکاک نسبت به ضرایب اطمینان تحلیل احتمالاتی



شکل(۳) : نمودار اثر پراکندگی پارامترهای ورودی بر ضریب تغییرات (S-F)

بررسی تاثیر پراکندگی داده های ورودی در نتیجه تحلیل احتمالاتی

با توجه به نمودارهای حاصل از آنالیزهای انجام یافته نتایج زیر بدست می آید:

- هر چه نا معینی و پراکندگی داده های ورودی بیشتر باشد ، نتیجتاً پراکندگی و تغییرات پارامترهای خروجی نیز بیشتر خواهد شد [4] و نیز همچنانکه از نمودارهای (۲) الی (۳) مشخص است در تحلیل پایداری شیبها هر چه پراکندگی پارامترهای ورودی مانند ϕ ، C ، γ افزایش یابد طبیعتاً پراکندگی FOS نیز بیشتر خواهد گردید .
- با وجود اینکه اختلاف میانگین مقدار ضرایب اطمینان از روش های مختلف تعادل حدی چیزی در حدود ۰.۲٪ الی ۱.۵٪ است و حتی بعضی مواقع در روشهایی مانند یانبوکة تنها معادلات نیرو ارضا می شوند این اختلاف به ۳۰٪ می رسد ولی میزان اختلاف در ضریب تغییرات FOS روش های مختلف بازای پراکندگی پارامترهای ورودی در بدترین شرایط در حدود ۰.۵٪ می باشد
- با وجود اختلاف نزدیکی که در میزان اختلاف ضرایب تغییرات FOS روش های مختلف تعادل حدی در نمودار دیده می شود چیزی که قابل ملاحظه می باشد این است که در روش های معمولی و یانبو نسبت به دیگر روش ها کمترین ضریب تغییرات FOS به ازای پراکندگی ϕ دیده می شود در حالی که این دو روش دارای بیشترین ضریب تغییرات FOS به ازای پراکندگی C ، γ نسبت به دیگر روش ها می باشند.



۴. نتیجه مهم دیگری که برداشت می شود این است که ضریب اطمینان نسبت به پراکندگی پارامتر ϕ بسیار حساس تر از C, γ میباشد ولی این نتیجه همیشه صادق نیست زیرا هنگامی که میانگین مقدار ϕ (به درجه) از لحاظ عددی نسبت به C (به kpa) خیلی کوچکتر باشد به تبع آن ضریب تغییرات هر چه بزرگ هم باشد اثرات پراکندگی C بیشتر خواهد بود اما در شرایطی که این پارامترها به لحاظ نسبی اختلاف کمی داشته باشند اثرات پراکندگی ϕ بیشتر می باشد و کمترین پراکندگی ضریب اطمینان مربوط به تغییرات سطح فراتیک آب می باشد.
۵. تاثیر افزایش انحراف از معیار در یک پارامتر تغییرپذیر باعث افزایش انحراف معیار ضرایب FOS می شود که با یکدیگر دارای رابطه خطی هستند.

تاثیر همبستگی پارامترهای مقاومتی در تحلیل احتمالاتی

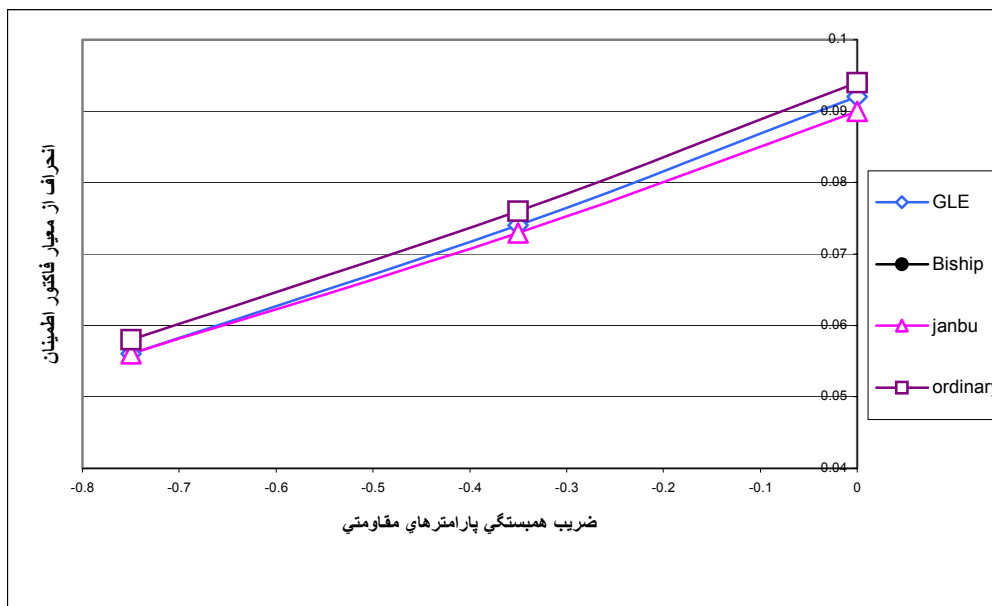
جهت بررسی تاثیر همبستگی پارامترهای C و ϕ در نتیجه تحلیل احتمالاتی با ثابت نگاه داشتن هندسه و میانگین مقادیر پارامترهای ورودی و اعمال ضرایب تغییرات ۲۰٪ برای C و ϕ و ۱۰٪ برای γ در ۳ حالت با ضرایب همبستگی صفر، ۳۵٪- و ۷۰٪- تحلیل احتمالاتی صورت گرفت [2] و جهت مقایسه، در هر حالت از دو روش تعادل حدی استفاده گردید که نتایج این تحلیل ها در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱) نتایج تحلیل احتمالاتی با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی مختلف

	روش بیشاپ ساده شده			روش یانبو ساده شده		
	$r = -0.7$	$r = -0.35$	$r = 0$	$r = -0.7$	$r = -0.35$	$r = 0$
Mean F of S	1.3265	1.3266	1.3267	1.2644	1.2719	1.2794
Standard Dev.	0.058	0.076	0.094	0.056	0.073	0.09
c.o.v.(%)	4.37%	5.72%	7.08%	4.43%	5.73%	7.03%
Reliability Index	5.583	4.531	3.479	4.692	3.895	3.098
P (Failure) (%)	0.000	0.0125	0.025	0.056	0.48175	0.9069
Min F of S	1.1185	1.0273	0.9361	1.0638	0.9839	0.904
Max F of S	1.5833	1.6669	1.7505	1.515	1.6038	1.6926
# of Trials	100000	100000	100000	100000	100000	100000

با فرض اینکه پارامترهای مقاومتی وابسته یا غیر وابسته هستند مشخص می گردد که تحلیل احتمالاتی متأثر از این فرض بوده و با وجود اینکه میانگین ضرایب اطمینان حاصل از پارامترهای مقاومتی وابسته و غیر وابسته اختلاف ناچیزی دارند ولی در حالت پارامترهای مقاومتی غیر وابسته، انحراف از معیاری که برای توزیع نرمال ضرایب اطمینان محاسبه می شود تقریباً ۱/۶ برابر انحراف از معیار مربوط به تحلیل احتمالاتی با ضریب همبستگی ۷۰٪- می باشد و بیشترین انحراف معیار هم مربوط به عدم همبستگی آنها میباشد. بنابراین اگر به درستی بنا به تحقیقات انجام یافته وابستگی پارامترهای مقاومتی وجود داشته باشد فرض غیروابستگی پارامترها احتمال گسیختگی را افزایش می دهد.

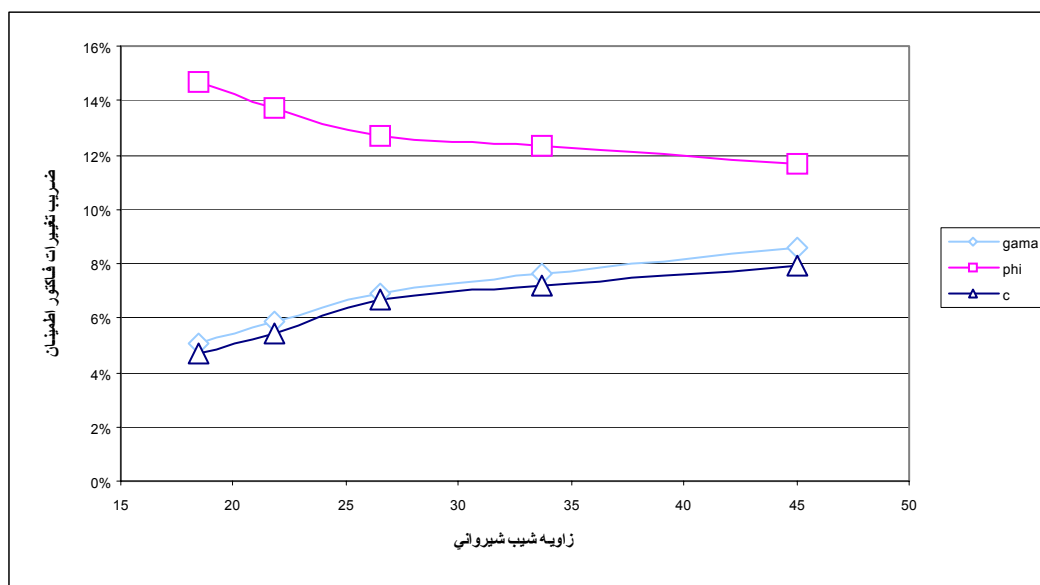
و نیز پس از تحلیل احتمالاتی با ضرایب همبستگی مختلف و با استفاده از روشهای تعادل حدی معمولی، یانبو ساده شده، بیشاپ ساده شده و تعادل حدی تعمیم یافته، مشاهده می گردد که اختلاف ناچیزی در نتایج تحلیل روشهای مذکور به ازای یک ضریب ثابت همبستگی وجود دارد. شکل (۴)



شکل (۴): تحلیل احتمالاتی با در نظر گرفتن ضریب همبستگی پارامترهای مقاومتی

بررسی اثرات تغییر شیب در پراکندگی نتایج تحلیل احتمالاتی

جهت بررسی اثر تغییرات شیب با وجود پراکندگی یکی از پارامترهای ورودی بر نتیجه تحلیل احتمالاتی، یک شیروانی به ارتفاع ۲۰ متر با مشخصات ϕ و C, γ به عنوان پارامترهای تغییر پذیر با ضریب تغییرات ثابت در نظر گرفته و منحنی تغییرات پراکندگی FOS در شرایط تغییر پذیری یکی از پارامترها موقعی که شیب شیروانی افزایش می یابد، ترسیم گردید. شکل (۵)



شکل (۵): بررسی پراکندگی FOS در اثر افزایش شیب در سه حالت تغییر پذیری هر یک از پارامترهای ورودی

در شکل (۵) مشاهده می شود که در اثر افزایش شیب، پراکندگی ضرایب اطمینان در حالت تغییر پذیر بودن زاویه اصطکاک روند کاهشی و در حالت تغییر پذیر بودن چسبندگی و وزن مخصوص خاک روند افزایشی دارد این جمله بدان معنی است که با افزایش شیب شیروانی که احتمال گسیختگی نیز افزایش پیدا می کند تغییرات ϕ در پراکندگی FOS تاثیر کمتری نسبت به حالتی که شیب ملایمتر است خواهد داشت در حالی که برای دو پارامتر C و γ قضیه برعکس می باشد.



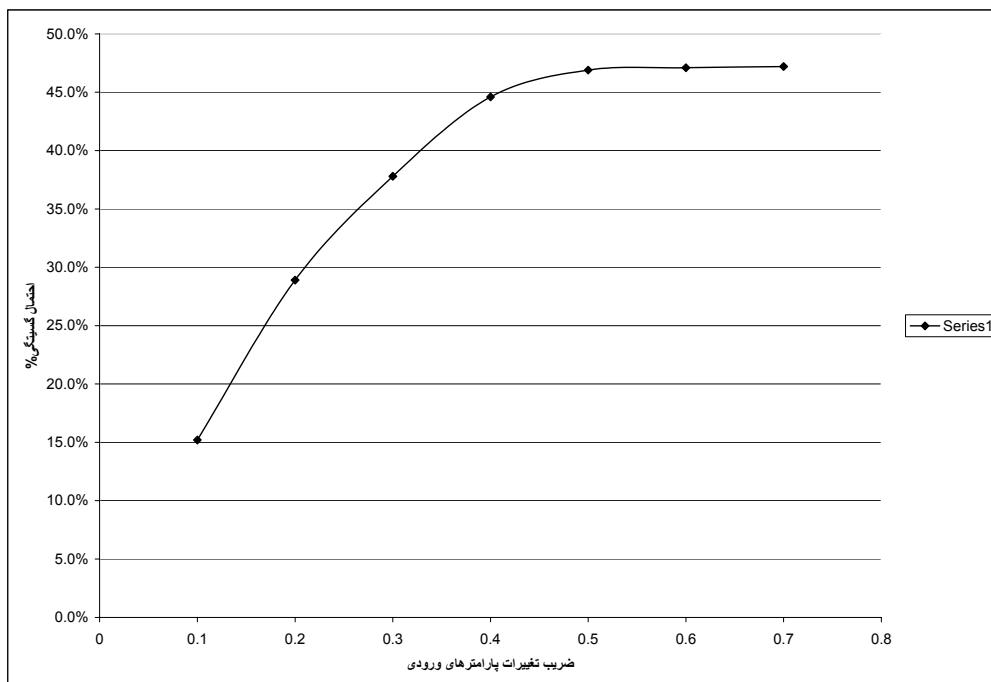
بررسی اثر پراکندگی در محاسبه احتمال گسیختگی

در روش قطعی ضریب اطمینان که حاصل تقسیم مجموع نیروهای مقاوم بر مجموع نیروهای محرک است، بیانگر میزان ایمنی شیروانی ها می باشد. اگر ضریب اطمینان بزرگتر از ۱ گردد یعنی شیب ایمن است و اگر کوچکتر از ۱ شود نشان دهنده ناپایداری و لغزش خواهد بود. در روش احتمالاتی نیز که برای ضریب اطمینان توزیع احتمالاتی بدست می آید می توان احتمال گسیختگی را معادل احتمال اینکه ضریب اطمینان حاصله کوچکتر از ۱ شود تعبیر نمود. بدین ترتیب سطح زیر منحنی توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان در محدوده قبل از ۱ برابر احتمال گسیختگی می گردد. از آنجا که احتمال کوچکتر شدن ضریب اطمینان از ۱، معادل احتمال کوچکتر شدن مقاومت از بار می باشد، می توان گفت که احتمال گسیختگی رابطه مستقیمی با سطح محصور بین منحنی های توزیع احتمالاتی بار و مقاومت خواهد داشت. [5], [6]

در روش شبیه سازی مونت کارلو از بین خروجیهایی که بعنوان ضریب اطمینان محاسبه گردیده اند می توان احتمال گسیختگی را بدست آورد:

$$P(t) = \frac{\text{تعداد کل ضرایب اطمینان محاسبه شده}}{\text{تعداد ضرایب اطمینان محاسبه شده کوچکتر از ۱}} = \text{احتمال گسیختگی}$$

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود با افزایش ضریب تغییرات یکسان برای داده های ورودی احتمال گسیختگی افزایش یافته و از ضریبی به بعد منحنی روند ثابتی در پیش می گیرد.

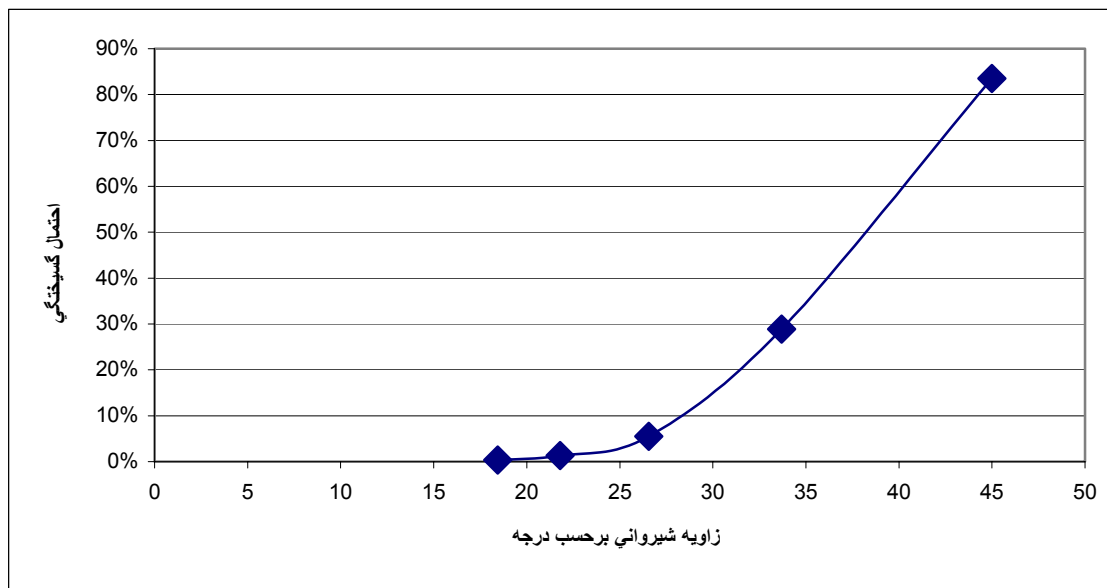


شکل(۶): تغییرات احتمال گسیختگی در اثر افزایش ضریب تغییرات پارامترهای ورودی با توزیع نرمال

بزرگ بودن ضریب تغییرات به دودلیل ممکن است رخ دهد:

۱. توده مورد بررسی بسیار ناهمگن و نتایج آزمایشات بروی پارامترهای ورودی تحلیل تغییرات وسیع را نشان دهد.
۲. اطلاعات ما نسبت به توده مورد بررسی کم باشد، بدین صورت که اگر تعداد آزمایشاتی که در یک توده انجام گرفته کم باشد و ابهام در شناسایی لایه ها زیاد باشد، جهت منظور کردن پراکندگی توده خاک بایستی ضریب تغییرات را بیشتر از آنچه از داده های محدود بدست آمده است در نظر گرفت.

جهت کاربردی کردن استفاده از تحلیل احتمالاتی در پایداری شیروانی ها مخصوصاً "دامنه سدهای خاکی مثال نوعی تشریح می شود یک شیروانی به ارتفاع ۲۰ متر و با فرض توزیع نرمال برای پارامترهای خاک تعریف گردید. ضریب تغییرات برای C و ϕ برابر ۲۰٪ و برای γ باندازه نصف آن یعنی ۱۰٪ منظور و تحلیل احتمالاتی برای شیب های متفاوت انجام شد در شکل (۷) با افزایش شیب دیده میشود که احتمال گسیختگی افزایش پیدا کرده است. در این حالت اگر ریسک مجاز گسیختگی را داشته باشیم می توانیم با استفاده از نمودار حاصل شده شیب مجاز شیروانی را بدست آوریم.



شکل (۷): تغییرات احتمال گسیختگی نسبت به تغییرات شیب

نتیجه گیری

درمقایسه روش تحلیل قطعی و احتمالاتی رویدادگسیختگی بروی یک مورد عملی مشخص می گردد که ضریب اطمینان حاصله از روش قطعی عدم گسیختگی را نشان می دهد در حالی که در تحلیل احتمالاتی، گسیختگی خیلی محتمل است. [7] نیز امکان دارد که در طراحی ها به روش قطعی خیلی محافظه کاری شده باشد.

قبلاً نیز بحث شد، بعلت نامعینی های موجود در حل مسائل پایداری شیروانی، مانند تغییرپذیری خصوصیات خاک و فرضیات ساده کننده در معادلات تحلیلی روش های مختلف، معمولاً مهندسیین با استفاده از روش های قطعی و محاسبه یک عدد بعنوان ضریب اطمینان نمی توانند میزان خطر و ریسک موجود را شناسایی و محاسبه نمایند. اما در روش احتمالاتی چون برای ضریب اطمینان توزیع احتمالاتی بدست می آوریم، می توانیم نسبت به احتمال وقوع ضرایب اطمینان مختلف، قضاوت نموده و احتمال گسیختگی را در هر حالت محاسبه نماییم. بنابراین لزوم رویکرد جامعه مهندسی به انجام تحلیل های احتمالاتی جهت رسیدن به طرح های بهینه و ایمن مشخص می گردد. خصوصاً وقتی که روش ساده شبیه سازی کامپیوتری نیز هموار کننده مشکلات حل احتمالاتی مسائل می باشد.

مراجع

References

1. Bishop, A.W. and Morgenstern, N., 1960. Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, Vol. 10, No. 4, pp. 164-169
2. Aberamson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. and Boyse, G.M., 2000. *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, New York.
3. Malkawi H., Hassan W.F., Abdulla F.A. (2000) "Uncertainty and Reliability Analysis Applied to Slope Stability"; *Elsvier, Structural Safety*, 22, (2000) pp:161-187
4. *Slope/w Manual*, 2001, Geoslope, Inc.
5. Duncan J.M., (2000) "Factors of Safety And Reliability in Geotechnical Engineering"; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; Vol. 126. No.4
6. Christian JT, Ladd CC, Baccher GB. (1994) "Reliability applied to slope stability analysis". *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*; 120(12) pp:2180-2207.
7. Ireland, H.O., 1954. Stability Analysis of the Congress Street Open Cut in Chicago, *Geotechnique* 4(4).