

## تحلیل پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها به کمک ستونهای سنگی

محمود قضاوی، دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تلفن: 021 88779623؛ فاکس: 021 88779476، E-mail: ghazavi\_ma@Kntu.ac.ir

رضا پورحسینی، استادیار دانشکده عمران، مجتمع فنی مهندسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

تلفن: 09133524829؛ فاکس: ، E-mail:

علی شاهمندی، کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، مجتمع فنی مهندسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

تلفن: 09131162850، E-mail: ali\_shahmandy@yahoo.com

### چکیده

پایداری شیروانیها همواره یکی از مهمترین مسائل موجود در مهندسی ژئوتکنیک به شمار رفته و موضوع گسیختگی شیپها و بنابراین پایداری آنها هم در شیپهای طبیعی و هم در شیپهای مصنوعی مطرح بوده است. معیضا در مقام توجه به بزرگی خسارات وارده به تأسیسات مستقل دیگر که بوسیله گسیختگی شیپها حاصل می گردد، مهندسین ژئوتکنیک گسیختگی شیپ را جزء عوامل اصلی خرابی قلمداد نموده و توجه فوق العاده ای بویژه در مناطق لرزه خیز به آن معطوف می دارند. امروزه تکنیکهای متنوعی همچون اصلاح هندسی، زهکشی، دیوار حائل، نصب شمع، میخ کوبی، استفاده از ژئوسنتتیکها و یا بکارگیری ترکیبی از این روشها جهت افزایش ضریب اطمینان پایداری یک شیپ در مقابل گسیختگی به کار گرفته می شود.

استفاده از ستونهای سنگی جهت مسلح سازی یکی دیگر از این روشها است. در این مقاله، بر پایه روش تعادل حدی و با صرف نظر از مؤلفه قائم زلزله روشی تحلیلی جهت تعیین ضریب اطمینان لرزه ای (شبه استاتیکی) شیروانی مسلح به گروه (چندین ردیف) ستون سنگی ارائه گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از این رابطه با نتایج حاصل از نرم افزار اجزاء محدود دو بعدی GEO-OFFICE نشان دهنده اختلاف ناچیز و در نتیجه بیاتگر دقت بالای رابطه استخراج شده می باشد. علاوه بر این، مطالعات پارامتریک جهت تعیین محل بهینه ستون در شیپ جهت دستیابی به بالاترین ضریب اطمینان پایداری انجام گردیده است. این مطالعات پارامتریک شامل بررسی اثر تغییر پارامترهایی همچون مشخصات ستون سنگی (قطر و فاصله آنها)، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و مصالح ستون (چسبندگی، زاویه اصطکاک، وزن مخصوص و...)، مشخصات هندسی شیپ (ارتفاع و زاویه شیپ) و مؤلفه افقی زلزله می باشد.

**کلید واژه ها:** شیروانی، ضریب اطمینان، رس اشباع، ستون سنگی، زاویه اصطکاک، معادله تحلیلی.

### 1. مقدمه

به طور کلی عوامل مؤثر متعددی در پایداری یا گسیختگی یک شیروانی خاکی دخالت دارند که عمده ترین این پارامترها عبارتند از: وزن خاکریز، پارامترهای مقاومتی خاک، فشار آب منفذی، ناهمگنی توده خاک، بارهای خارجی اعم از استاتیکی، ارتعاش و زلزله، ترکهای کششی، شکل هندسی خاکریز شامل ارتفاع و شیپ و غیره [1].

پایدارسازی مهندسی عموماً به متوقف نمودن یا برگرداندن فرآیند ناپایداری اطلاق می گردد. جلوگیری از حرکت یک شیب و یا افزایش ضریب اطمینان با استفاده از روشهای سازه ای یا ژئوتکنیکی امکانپذیر است. از جمله تکنیک هایی که نیروهای پایدارکننده و یا مقابله کننده را افزایش می دهند و عمدتاً به صورت بیرونی بر لغزش خاک و یا سنگ عمل می نمایند عبارتند از [1]:

روشهای هندسی، حصارهای سازه ای (دیوارهای صلب، شمع و...)، پوشش نفوذ پذیر و یا نفوذ ناپذیر در سطح، اصلاح هیدرولیکی، اصلاح فیزیکی، اصلاح شیمیایی، اصلاح مکانیکی (تراکم)، مقاوم سازی (ژئوسنتتیکها، میخ کوبی خاک) و غیره.

از جمله سایر تکنیکهای مورد استفاده در پایدارسازی شبیها استفاده از ستونهای سنگی در راستای افزایش مقاومت برشی در سطح لغزش می باشد. مهمترین کاربردهای ستونهای سنگی عبارتند از [2]:

1. افزایش پایداری شیروانیهای طبیعی و مصنوعی

2. افزایش ظرفیت باربری پی های سطحی در خاکهای سست

3. کاهش نشستهای کلی و نسبی

4. کاهش پتانسیل روانگرایی خاکهای ماسه ای

احداث ستون سنگی برای مسلح سازی و بهبود سازی خاک معمولاً نسبت به روشهای دیگر بهبود سازی مثل ژئوتکستایلها، تزریق، تراکم و... راحت تر و ارزان قیمت تر است و در مواردی نسبت به دیگر روش ها عملکرد بهتری نشان می دهد [2]. معمولاً قطر این ستونها بین ۰.۳ تا ۱.۲ متر و فواصل آنها بین ۱.۵ تا ۳ متر متغیر است. به طور معمول ستونهای سنگی غالباً در چند ردیف (بسته به وضعیت خاک) در خاک زیر شیروانی که نگهدارنده شیروانی است اجرا می شود که در افزایش پایداری و افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست مؤثر است. در این مقاله با صرف نظر از مؤلفه قائم زلزله معادله ای تحلیلی بر پایه روش تعادل حدی جهت تعیین ضریب اطمینان شبه استاتیکی شیروانیهای رسی اشباع همگن و مسلح به چندین ردیف ستون سنگی بدست آمده است. در ادامه با بهره گیری از رابطه استخراج شده تغییرات ضریب اطمینان شیروانی مسلح به ستون در حالت جابجایی ستون در طول شیب برای تعیین بهترین مکان استقرار ستون در شیب جهت دستیابی به بالاترین ضریب اطمینان بررسی گردیده است. همچنین در مطالعات پارامتریک انجام گرفته اثر تغییر پارامترهایی چون مشخصات هندسی شیب (ارتفاع و شیب)، قطر ستون سنگی، مشخصات ژئوتکنیکی خاک و ستون، ضریب افقی زلزله و... در نظر گرفته شده است.

## ۲. تحلیل پایداری لرزه ای (شبه استاتیکی) شیروانیهای مسلح به ستونهای سنگی

### ۲.۱. رابطه تحلیل پایداری لرزه ای برای شیب غیر مسلح

مؤلفه افقی زلزله با افزایش نیروی محرک رانش باعث کاهش ضریب اطمینان می گردد در حالیکه مؤلفه قائم هر دو نیروی محرک و مقاوم را افزایش یا کاهش می دهد (بسته به جهت آن) بنابراین مؤلفه افقی

زلزله تأثیر بیشتری بر ناپایداری شیب خواهد داشت [3]. بنابراین در این تحقیق تنها مؤلفه افقی زلزله در نظر گرفته شده و فرض بر عدم تغییر چسبندگی خاک در طول زمان زلزله است.

[4] Koppula (1984) رابطه ای را جهت تعیین ضریب اطمینان شبه استاتیکی در شیروانیهای رسی اشباع همگن ( $\Phi = 0$ ) بصورت ذیل ارائه نمود:

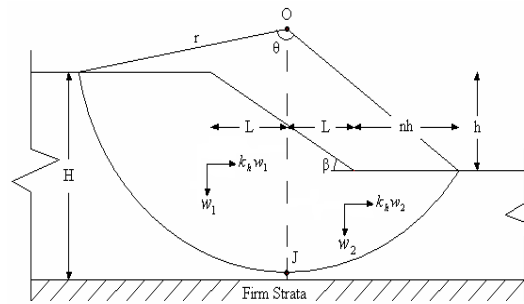
(1)

$$SF = \frac{a_0}{\gamma} N_1 + \frac{c_0}{\gamma h} N_2$$

که در این رابطه  $N_1$  و  $N_2$  ضرایب پایداری،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک و  $a_0$  ضریب ثابت است. ضرایب پایداری تابعی از ضریب افقی زلزله ( $k_h$ )، زاویه شیب ( $\beta$ ) و ضریب عمق ( $D$ ) می باشند.

$$D = \frac{H}{h} \quad (2)$$

شکل ۱ تحلیل لرزه ای یک شیب غیر مسلح در خاک رس همگن را نشان می دهد که سطح لغزش بحرانی در این حالت همانند روش تیلور در حالت استاتیکی [5] با استفاده از پارامترهای  $D$ ،  $\beta$  و  $nh$  ضریبی است که به دو پارامتر  $D$  و  $\beta$  وابسته است بدست می آید.



شکل ۱. تحلیل پایداری شیب رس همگن اشباع در حالت لرزه ای ( $\Phi = 0$ ) [4,5]

همچنین در این روش چسبندگی زهکشی نشده ( $c_u$ ) خاک می تواند بصورت خطی از سطح با عمق تغییر کند:

(۳)

$$c_u = c_0 + a_0 z$$

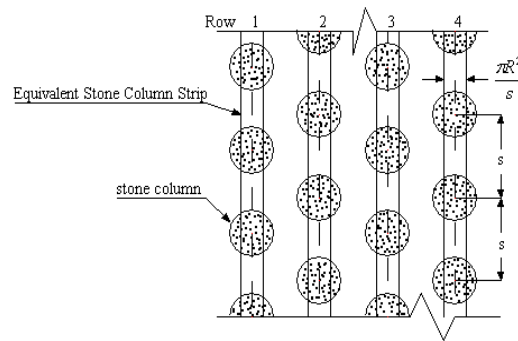
در این تحقیق فرض بر عدم تغییر چسبندگی در عمق است.

### ۲.۲. رابطه تحلیل پایداری لرزه ای برای شیب مسلح به یک ردیف ستون سنگی

برای تحلیل دو بعدی شیب ها ستونهای سنگی سه بعدی می بایست به حالت دو بعدی تبدیل شوند. شکل ۲ نمونه ای از آرایش ستونهای سنگی را نشان می دهد که در آن یک ردیف ستون پشت سرهم که به فاصله مرکز تا مرکز  $s$  از یکدیگر قرار گرفته اند با یک نوار سنگی پیوسته معادل شده اند. در هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی حجم برابر بوده و بر اساس این تساوی حجم عرض معادل نوار سنگی پیوسته از رابطه ذیل بدست می آید [2,6]:

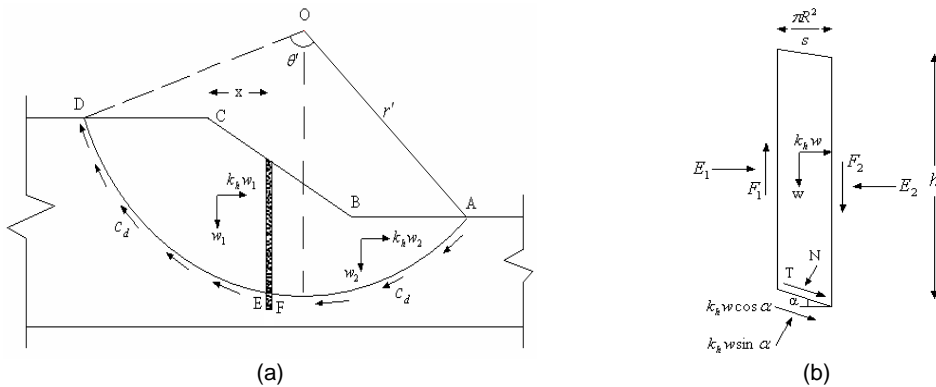
$$\frac{\pi R^2}{s} \quad (۴)$$

در این رابطه  $R$  شعاع ستونهای سنگی سه بعدی و  $s$  فاصله مرکز تا مرکز ستونهای سه بعدی در هر ردیف می باشد.



شکل ۲. پلان گروه ستون سنگی [2]

شکل ۳ شیب مسلح به یک ردیف ستون سنگی که به فاصله  $x$  از رأس شیب قرار گرفته را در حالت لرزه ای در رس اشباع همگن و دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر نوار ستون سنگی از سطح شیروانی تا سطح لغزش را نشان می دهد.



شکل ۳. (a) تحلیل پایداری شیب رس همگن اشباع مسلح به ستون سنگی در حالت لرزه ای ( $\Phi = 0$ ); (b) دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر نوار ستون در حالت شبه استاتیکی

با توجه به شکل ۳ و در نظرگیری تعادل نیروها و نیز با فرض  $F_1 = F_2$  و  $E_1 = E_2$  می توان نوشت:

$$w = \gamma_{sat} \frac{\pi R^2}{s} h' \quad (5)$$

در این رابطه  $w$  وزن نوار ستون سنگی،  $\gamma_{sat}$  وزن مخصوص اشباع مصالح ستون و  $h'$  ارتفاع نوار ستون از سطح شیروانی تا سطح لغزش است. بنابراین تنش عمودی وارد بر کف نوار ستون سنگی بصورت زیر خواهد بود:

$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot h' \cdot \cos^2 \alpha - k_h \cdot \gamma_{sat} \cdot h' \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

در رابطه اخیر  $\alpha$  زاویه گسیختگی نوار ستون با افق در سطح لغزش مطابق شکل 3(b) می باشد. در حالت وجود ستون سنگی در شیب مقاومت برشی و مقاومت برشی بسیج شده در سطح لغزش از روابط زیر محاسبه می گردند:

$$\tau_f = c_u + \Delta \tau_f = c_u + \sigma' \cdot \tan \phi = c_u + [\gamma' \cdot h' \cdot \cos^2 \alpha - k_h \cdot \gamma_{sat} \cdot h' \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha] \tan \phi \quad (7)$$

$$\tau_d = c_d + \Delta \tau_d = c_d + \sigma' \cdot \tan \phi_d = c_d + [\gamma' \cdot h' \cdot \cos^2 \alpha - k_h \cdot \gamma_{sat} \cdot h' \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha] \tan \phi_d \quad (8)$$

در دو رابطه فوق  $\gamma'$  وزن مخصوص مؤثر مصالح ستون است. بهمین ترتیب لنگرهای محرک و مقاوم بصورت زیر خواهند بود:

$$M_d = w_1 l_1 - w_2 l_2 + k_h (w_1 z_1 + w_2 z_2) \quad (9)$$

$$M_R = r' \cdot c_u (DE + FA) + r' \frac{\pi R^2}{s} [\gamma' \cdot h' \cdot \cos \alpha - k_h \cdot \gamma_{sat} \cdot h' \cdot \sin \alpha] \tan \phi \quad (10)$$

در رابطه لنگر محرک  $l_1, l_2$  فواصل افقی نیروی وزن تا مرکز دایره لغزش و  $z_1, z_2$  نیز فواصل قائم نیروی شبه استاتیکی زلزله تا مرکز دایره لغزش است.

برای برقراری تعادل لازم است تا لنگرهای محرک و مقاوم برابر گردند یعنی  $M_d = M_R$  بنابراین ضریب اطمینان در حالت وجود یک ردیف ستون سنگی در شیب بصورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$(SF)_{col} = \frac{r' \cdot c_u (r \theta' - \frac{\pi R^2}{s} \times \frac{1}{\cos \alpha}) + r' \frac{\pi R^2}{s} \tan \phi (\gamma' \cdot h' \cdot \cos \alpha - k_h \cdot \gamma_{sat} \cdot h' \cdot \sin \alpha)}{w_1 l_1 - w_2 l_2 + k_h (w_1 z_1 + w_2 z_2)} \quad (11)$$

با توجه به نتایج حاصل از تحلیلهای انجام شده در نرم افزار GEO-OFFICE و نیز با توجه به شباهت رفتار مصالح ستون و خاک می توان بیان نمود که شکل سطح لغزش در حالت وجود ستون در شیب و در

حالت عدم وجود ستون بسیار نزدیک بوده و با برقراری تساوی  $r\theta = r'\theta'$  (اشکال ۱ و ۳(a)) رابطه ضریب اطمینان نسبی (که از تقسیم رابطه 1۱ به رابطه ضریب اطمینان شیب غیر مسلح بدست می آید) در شیب مسلح به یک ردیف ستون بصورت ذیل بیان می شود:

(۱۲)

$$SF_{ratio} = \frac{(SF)_{col}}{(SF)_{no-col}} = 1 - \frac{\pi R^2}{s.r.\theta.\cos\alpha} + \frac{\gamma'h'\pi R^2.\cos\alpha.\tan\phi}{s.c_u.r.\theta} - \frac{\gamma_{sat}.h'\pi R^2.k_h.\sin\alpha.\tan\phi}{s.c_u.r.\theta}$$

### ۲.۳. رابطه تحلیل پایداری لرزه ای برای شیب مسلح به m ردیف ستون سنگی

در بسیاری از موارد با اجرای یک ردیف ستون در شیب نمی توان به حداقل ضریب اطمینان مجاز دست یافت از اینرو می توان با اجرای چند ردیف ستون به ضریب اطمینان بالاتری رسید. در حالت استفاده از m ردیف ستون در شیب رابطه ضریب اطمینان همانند روش فوق بصورت زیر حاصل می شود:

(۱۳)

$$SF_{ratio} = \frac{(SF)_{col}}{(SF)_{no-col}} = 1 - \frac{\pi R^2}{s.r.\theta} \left( \sum_{i=1}^m \frac{1}{\cos\alpha_i} \right) + \frac{\gamma' . \pi R^2 . \tan\phi}{s.c_u . r . \theta} \left( \sum_{i=1}^m h'_i . \cos\alpha_i \right)$$

که در آن  $h'_i$  و  $\alpha_i$  متعلق به هر ردیف از ستونها می باشند.

### ۳. مطالعات پارامتریک

پس از استحصال روابط تحلیلی فوق حالت‌های مختلفی از قرارگیری ستونهای سنگی در شیب در نرم افزار اجزاء محدود GEO-OFFICE شبیه سازی و با نتایج حاصل از این روابط مقایسه گردید و با مشاهده اختلافی کمتر از ۵٪ صحت و اعتبار روابط حاصل تأیید گردید (لازم بذکر است اعتبار و صحت نتایج نرم افزار اجزاء محدود GEO-OFFICE نیز با استفاده از نتایج چند اثر پژوهشی [7,8,9,10] مورد بررسی قرار گرفته است). جداول ۱ و ۲ مشخصات ژئوتکنیکی خاک رس و مصالح ستون مورد استفاده در مطالعات پارامتریک را نشان می دهند.

جدول ۱. مشخصات خاک رس

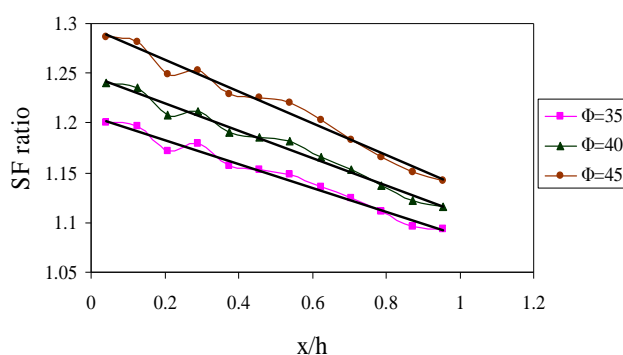
Saturated unit weight [kN/m <sup>3</sup> ]	Friction angle [degree]	Undrained cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	Poisson's ratio	Modulus of elasticity [kN/m <sup>2</sup> ]
۱۵		25		
16	۰	۳۰	۰.۴۸	۵۰۰۰
1۷		40		

جدول ۲. مشخصات مصالح ستون سنگی

equivalent strip width [m]	Saturated unit weight [kN/m <sup>3</sup> ]	Friction angle [degree]	cohesion [kN/m <sup>2</sup> ]	Poisson's ratio	Modulus of elasticity [kN/m <sup>2</sup> ]
0.50	22	35	۰	۰.۳۰	۵۰۰۰۰
0.65		40			
0.80		45			

پس از اطمینان یافتن از نتایج روابط تحلیلی بدست آمده در این مقاله، مطالعات پارامتریکی شامل تغییرات مشخصات هندسی شیروانی (ارتفاع و شیب)، مشخصات ژئوتکنیکی خاک و مصالح ستون (وزن مخصوص، زاویه اصطکاک و چسبندگی)، قطر و فاصله ستونها و ضریب افقی زلزله جهت تعیین بهترین محل قرارگیری ستونها که منجر به بیشترین افزایش ضریب اطمینان گردد انجام شده است.

به منظور تعیین موقعیت بهینه ستون نخست با استفاده از رابطه [4] Koppula (1984) ضریب اطمینان شیب غیرمسلح و سپس سطح لغزش بحرانی مطابق آنچه در بخش ۲.۱ ذکر شد تعیین می گردد. پس از آن ردیف ستون سنگی در طول شیب جابجا و در هر بار جابجایی با استفاده از روابط حاصل، ضریب اطمینان متناظر تعیین گردیده و با ترسیم نمودار تغییرات ضریب اطمینان در مقابل مکان قرارگیری ستون نسبت به رأس شیب محل بهینه مشخص خواهد شد که پس از تحلیلهای متعدد این محل در رأس و در حوالی آن بدست آمده و با جابجایی ستون از رأس به سمت پنجه شیب از میزان تأثیر ستون بر افزایش پایداری کاسته می شود (شکل ۴ نمونه ای از این نمودارها را نشان می دهد). لازم بذکر است که تغییر موقعیت ستون در شیب همراه با تغییرات پارامتریک مذکور بوده که در کلیه حالات نتایج مشابهی ملاحظه می گردد.



شکل ۴. نمودار تغییرات ضریب اطمینان نسبی لرزه ای نسبت به فاصله ستون از رأس شیب در حالت قرارگیری یک ردیف ستون در شیب (Φ زاویه اصطکاک مصالح ستون)

### ۳.۱. چگونگی تأثیر ستون سنگی در افزایش پایداری

ستون سنگی در خاک اشباع با دو اثر قادر به افزایش ضریب اطمینان است:

۱- زهکشی و کاهش فشار آب منفذی

۲- افزایش مقاومت برشی سطح لغزش بدلیل زاویه اصطکاک زیاد ناشی از مصالح ستون، که عمده ترین اثر ستون در افزایش پایداری ناشی از همین عملکرد می باشد. در سطح لغزش با رسیدن به محل ستون سنگی افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت برشی ایجاد شده و پس از عبور از ستون، مقاومت به مقدار معمول خود باز می گردد، همچنین ملاحظه می گردد که موقعیت ستون سنگی در طول شیب بر میزان افزایش مقاومت برشی ایجاد شده در سطح لغزش مؤثر خواهد بود و حداکثر افزایش مقاومت برشی ناشی از وجود ستون، مربوط به حالتی است که ستون سنگی در رأس بالادست شیب و در حوالی آن استقرار یابد و با جابجایی ستون به سمت پایین دست شیب از میزان افزایش مقاومت برشی در سطح لغزش کاسته خواهد شد.

### ۴. خلاصه و نتیجه گیری

بطور کلی نتایج حاصل از تحلیلهای صورت گرفته توسط روابط تحلیلی حاصل در این مقاله را می توان بشرح ذیل خلاصه نمود:

۱. میزان افزایش پایداری لرزه ای یک شیروانی مسلح به ستون نسبت به همان شیروانی غیر مسلح تابع پارامترهای مختلفی چون مشخصات هندسی شیب، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و ستون، قطر و فواصل ستونها، محل قرارگیری ستون، تعداد ردیف ستون و... می باشد.
۲. بهترین محل قرارگیری یک ردیف ستون جهت دستیابی به حداکثر ضریب اطمینان رأس بالادست شیب و نزدیک به آن بوده و با افزایش زاویه شیب به سمت رأس جابجا می گردد. در حالت استقرار چند ردیف ستون در شیب حداکثر ضریب اطمینان در صورت قرارگیری ستونها در رأس و نزدیکی آن بطوریکه ستونها کمترین فاصله عملی را از یکدیگر داشته باشند بدست خواهد آمد.
۳. در حالت کلی با افزایش نیروی محرک رانش توده لغزش (که می تواند ناشی از پایین بودن مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، افزایش ارتفاع و زاویه شیب و نیز افزایش ضریب زلزله باشد) میزان تأثیر ستون در افزایش پایداری، افزایش یافته و با افزایش مقاومت برشی ستون (افزایش عرض نوار معادل و زاویه اصطکاک مصالح ستون) بر میزان افزایش پایداری افزوده می شود.
۴. به طور کلی منحنی تغییرات ضریب اطمینان پس از عبور از نقطه حداکثر با حرکت به سمت پایین دست شیب سیر نزولی داشته و از میزان تأثیر ستون کاسته می شود.



## مراجع

- [۱] کمک پناه، علی، پایدارسازی شیپها، چاپ اول، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۷۳.
- [۲] Barksdale R.D., Bachus R.C. 1983. Design and construction of stone columns, Federal Highway Administration Office of Engineering and Highway Operations, Volume I and II, Washington, DC.
- [3] کرامر، استیون، ژئوتکنیک لرزه ای، مجدالدین میرحسینی و بابک عارف پور، چاپ اول، پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۷۸.
- [4] Koppula S.D. Pseudo static analysis of clay slopes subjected to earthquake. *Geotechnique* 1984;34(1):71-79.
- [5] Taylor D.W. Stability of Earth Slopes. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers* 1937;24:197-246.
- [6] Cheung K. Geogrid reinforced light weight embankment on stone columns. *Roading Geotechnics* 1998;273-278.
- [7] Fredlund D.G, Scoular R.E.G. Using limit equilibrium concepts in finite element slope stability analysis. *Slope Stability Engineering*. Saskatoon; University of Saskatchewan, 1999.
- [8] GEO-OFFICE International Ltd. User's Guide GEO-OFFICE Office. Alberta, 2002.
- [9] Griffiths D.V, Lane P.A. Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique* 1999;49(3):387-403.
- [10] Rocscience Inc. Application of Finite Element Method to Slope Stability. Toronto, 2004.