

# استفاده از روش مونت کارلو ترکیبی برای یافتن سطح بحرانی شکست در شیروانیها

نویسنده: کامران گشتاسبی\*، مرتضی احمدی\* و یاسر نعیمی\*

\*بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

## An Efficient Search Method for Finding the Critical Slip Surface using the Compositional Mont Carlo Technique

By: K. Goshtasbi\*, M. Ahmadi\* & Y. Naeimi\*

\*Department of Mining Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۱۲/۰۲

### چکیده

موقعیت سطح بحرانی شکست و ضریب اطمینان کمینه مربوط به آن، دو جزء مکمل در تحلیل پایداری شیروانیهای خاکی هستند. برای یافتن سطح بحرانی شکست، اغلب از روشهای جستجوی مختلفی مانند جستجوی شبکه‌ای استفاده می‌شود که بدین منظور نرم افزارهای رایانه‌ای متعددی تا کنون تهیه شده و در بیشتر این نرم افزارها، از روشهای جستجوی بی‌اعتبار و غیرقابل اطمینان استفاده شده است. در این مقاله، از روش مونت کارلو که روشی مؤثر و معتبر است، استفاده می‌شود و در نهایت اعتبار این روش مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلیدواژه‌ها:** ضریب اطمینان، روش جستجو، سطح بحرانی شکست، مونت کارلو.

### Abstract

Locating the critical slip surface and the associated minimum factor of safety are two complementary parts in a slope stability analysis. A large number of computer programs exist to solve slope stability problems. Most of these programs, however, have used inefficient and unreliable search procedures to locate the global minimum factor of safety. This paper presents an efficient and reliable method to determine the global minimum factor of safety coupled with a modified version of the Monte Carlo technique. Examples are presented to illustrate the reliability of the proposed method.

**Key words:** Factor of safety, Method of search, Critical slip surface, Monte Carlo.

### ۱- مقدمه

Spencer (1973, 1967), Morgenstern & Price (1965) و Sarma (1979, 1973) در این زمینه مطالعاتی داشته‌اند و معمولاً از روش جستجوی شبکه‌ای (Grid search) و جستجوی نمونه (Pattern search)

در چهارده گذشته، براساس تحلیل تعادل حدی (Limiting equilibrium) و استفاده از روش قطعات (Methods of slices) گامهای مؤثری برداشته شده است. (Janbu (1993, 1954), Bishop (1955)



## ۲- جستجوی سطح بحرانی شکست دایره‌ای

در این روش، برای یافتن سطوح شکست بحرانی شبروانیها، به اطلاعات کمی نیاز است و به سرعت و به آسانی می‌توان آن را همراه با هر یک از روشهای تحلیل پایداری شیب از جمله روشهای بیشاپ، جانبو، اسپنسر، مرگسترن و پرایس به کار برد. بدین منظور، یک نرم افزار رایانه‌ای تهیه شده است که از روشهای تحلیل پایداری مذکور استفاده می‌کند. نیمرخ زمین‌شناسی، خواص مواد و محدوده جستجو ( $X_{min}, X_{max}$ ) اطلاعات ورودی این نرم افزار هستند.

## ۳- فرموله کردن مسئله

مسئله را می‌توان به صورت شکل ۱ در دستگاه دکارتی نمایش داد. نیمرخ توپوگرافی خاک، سطح آب زیرزمینی، سطوح ناپیوستگی لایه‌ها و سطح مرزی پایینی (خاک مقاوم و یا سنگ خردشده) به ترتیب با توابع ریاضی  $y=r(x)$  و  $y=L_j(x)$ ,  $y=w(x)$ ,  $y=g(x)$  بیان شده‌اند.

بر اساس شکل ۱، هر سطح شکست احتمالی با سه نقطه تعریف می‌شود: نقاط تقاطع سطح شکست با نیمرخ توپوگرافی خاک (نقطه A به مختصات  $(X_A, Y_A)$ ) و نقطه B به مختصات  $(X_B, Y_B)$  و نقطه O مرکز سطح شکست قاشقی به مختصات  $(X_O, Y_O)$ . لذا هر سطح شکست احتمالی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$S=[X_A, Y_A, X_B, Y_B, X_O, Y_O] \quad (1)$$

هدف اصلی، یافتن سطح بحرانی شکست با توجه به سطوح شکست احتمالی است. لذا تابع هدف مسئله، یافتن سطحی با کمترین ضریب اطمینان است. لذا تابع هدف مسئله و محدودیتهای آن به شرح زیر خواهد بود:

$$\text{Min } F(S)$$

$$\text{s.t. } X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$$

$$X_{\min} \leq X_A \leq \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}$$

$$\frac{X_{\max} + X_{\min}}{2} \leq X_B \leq X_{\max} \quad (2)$$

$$Y_A = g(X_A)$$

$$Y_B = g(X_B)$$

$$X_A < X_B$$

برای یافتن سطح بحرانی شکست استفاده کرده‌اند. (Gillett, 1987) پس از بررسی تعداد زیادی از نرم افزارهای پایداری شیب به این نتیجه رسید که الگوریتمهای مورد استفاده در یافتن سطح بحرانی شکست قابلیت اطمینان مناسبی ندارد. روش جستجوی شبکه‌ای، نسبتاً نادرست و غیرقابل اعتماد است، چرا که همه سطوح احتمالی برای شکست، قبل از شروع جستجو انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، جهت جستجو تحت تأثیر هندسه واقعی کنتورهای ضریب اطمینان قرار نگرفته است (De Natale, 1991).

روش جستجوی نمونه به علت آنکه سطوح احتمالی با پیشرفت عملیات جستجو انتخاب می‌شود، تا حدودی مؤثر است. اما محدودیت طول گام ثابت (Constant step-length restriction) به مفهوم یکسان بودن فاصله بین ارزیابیهای متوالی بدون توجه به فاصله جستجو از مقدار کمینه یا همسایگی آن وجود دارد (De Natale, 1991).

همسایگی آن وجود دارد (De Natale, 1991). Li & White (1987), Celestino & Duncan (1981) تناوبی (Alternating variable methods) برای یافتن سطح بحرانی شکست استفاده کرده‌اند.

Baker (1980) با به کارگیری روش اسپنسر، برای تعیین سطح بحرانی شکست از برنامه‌ریزی پویا (Dynamic Programming) استفاده کرد. (Chen, 1992) روشی ترکیبی را که از جستجوی تصادفی استفاده می‌کرد، معرفی نمود. روشهای مبتنی بر روش مونت کارلو (Mont Carlo Technique)، ساختار ساده‌ای از جستجوی تصادفی و فنون بهینه‌سازی دارند. در این روش، تعداد زیادی از سطوح احتمالی برای یافتن ضریب اطمینان کمینه تولید می‌شوند. بر اساس مسیر جستجو، فنون مونت کارلو به دو گروه گام تصادفی (Random Walking) و پرش تصادفی (Random Jumping) تقسیم می‌شوند. در روش پرش تصادفی، برای یافتن سطح شکست بحرانی، تعداد زیادی از سطوح احتمالی تصادفی بر اساس روشی که Siegel et al. (1981) ارائه کرده‌اند، تولید می‌شوند و هر سطح احتمالی بدون در نظر گرفتن سطوح احتمالی قبلی تولید می‌شود. در روش گام تصادفی، سطوح شکست به طور متوالی تولید می‌شوند، به گونه‌ای که سطح شکست  $i+1$  ام با توجه به سطح شکست  $i$  ام تعریف خواهد شد. در نتیجه یک سری برآورد بهبود یافته نزدیک به کمینه با کمترین تکرار به دست می‌آید (Cherubini & Greco, 1987; Greco, 1996).

در این مقاله، برای یافتن ضریب اطمینان کمینه در تحلیل پایداری شبروانیها، یک روش جستجوی جدید که ترکیبی از گام تصادفی و پرش تصادفی در فنون مونت کارلو است، ارائه می‌شود. این روش جستجو با پرش تصادفی شروع شده و سپس به گام تصادفی تبدیل می‌شود.

#### ۴- حل مسئله

زمانی که دامنه تغییرات (تلرانس) قابل قبولی بین ضریب اطمینانهای متوالی به وجود آید، ادامه می‌یابد. بحرانی‌ترین سطح شکست برای این مرحله،  $F(S^1)$  دایره‌ای است که  $A_1B_1$  می‌گذرد و مرکزش مرکز بحرانی  $O_{n1}$  باشد. این رویه از سطح شکست  $S_1$  آغاز شده و مرحله به مرحله و به طور متوالی برای کمینه ضریب اطمینان تکرار می‌شود:

$$F(S^1) > F(S^2) > F(S^3) \dots > F(S^k) > F(S^{k+1}) \dots$$

که  $F(S^1)$  ضریب اطمینان کمینه در مرحله اول است که توسط ماتریس زیر نمایش داده می‌شود:

$$F(S^1) = \begin{bmatrix} X_A^1 & Y_A^1 & X_B^1 & X_B^1 & Y_B^1 & X_{O_1}^1 & Y_{O_1}^1 \\ X_A^1 & Y_A^1 & X_B^1 & X_B^1 & Y_B^1 & X_{O_2}^1 & Y_{O_2}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_A^1 & Y_A^1 & X_B^1 & X_B^1 & Y_B^1 & X_{O_{n1}}^1 & Y_{O_{n1}}^1 \end{bmatrix}$$

$F(S^k)$  ضریب اطمینان کمینه در مرحله  $k$  می‌باشد که توسط ماتریس زیر نمایش داده می‌شود:

$$F(S^k) = \begin{bmatrix} X_A^k & Y_A^k & X_B^k & X_B^k & Y_B^k & X_{O_1}^k & Y_{O_1}^k \\ X_A^k & Y_A^k & X_B^k & X_B^k & Y_B^k & X_{O_2}^k & Y_{O_2}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_A^k & Y_A^k & X_B^k & X_B^k & Y_B^k & X_{O_{nk}}^k & Y_{O_{nk}}^k \end{bmatrix}$$

$n_1, n_2, \dots, n_k$  اعدادی هستند که دامنه تغییرات بین مقادیر ضریب اطمینان در محدوده قابل قبول برای مرحله‌های ۱، ۲، ... و  $k$  قرار گرفته است.

#### ۵- روش جستجو

برای به دست آوردن کاهش در ضریب اطمینان، نقطه  $A$  با مختصات  $(X_A^k, Y_A^k)$  مطابق شکل ۴ به طور تصادفی به نقطه  $(X_A^{k+1}, Y_A^{k+1})$  انتقال می‌یابد که:

$$X_A^{k+1} = X_A^k + \xi_A^k \quad Y_A^{k+1} = g(X_A^{k+1})$$

که  $\xi_A^k$  جابه‌جایی تصادفی بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\xi_A^k = N_X \cdot R_X \cdot D X_A^k$$

که  $R_X$  عددی تصادفی است که از جمعیت یکنواخت پخش شده در محدوده  $(0/5, -0/5)$  استخراج می‌شود؛  $N_X$  عددی است که جهت جابه‌جایی نقاط  $A$  و  $B$  را کنترل می‌کند و دارای مقادیر ۱- برای برگشت و

برای حل مسئله اولین سطح شکست توسط سه نقطه  $A_1, B_1, D_1$  بر اساس شکل ۲ در محدوده  $(X_{min}, X_{max})$  تعریف می‌شود. نقاط  $A_1$  و  $B_1$  را می‌توان به صورت تصادفی به شکل زیر ایجاد کرد:

$$X_{A_1}^1 = X_{min} + R_1 \cdot \frac{(X_{max} - X_{min})}{2} \quad Y_{A_1}^1 = g(X_{A_1}^1) \quad \text{مختصات نقطه } A_1$$

$$X_{B_1}^1 = X_{max} - R_2 \cdot \frac{(X_{max} - X_{min})}{2} \quad Y_{B_1}^1 = g(X_{B_1}^1) \quad \text{مختصات نقطه } B_1$$

که  $R_1$  و  $R_2$  اعداد تصادفی هستند که بین ۰ و ۱ تولید می‌شوند.

نقطه سوم  $(D_1)$  از تقاطع خط عمودی که از نقطه  $C_1$  (که در وسط خط  $A_1B_1$  قرار دارد) و خط عمودی که از نقطه  $A_1$  رسم می‌شود، به دست می‌آید. مختصات نقاط  $C_1$  و  $D_1$  به صورت زیر خواهد بود:

$$X_{C_1} = \frac{X_{A_1} + X_{B_1}}{2} \quad Y_{C_1} = \frac{Y_{A_1} + Y_{B_1}}{2} \quad \text{مختصات نقطه } C_1$$

$$X_{D_1} = X_{A_1} \quad \text{مختصات نقطه } D_1$$

نقطه  $E_1$ ، از تقاطع خط گسترش یافته  $Y=Y_{B_1}$  و خط  $D_1C_1$  به دست می‌آید. بحرانی‌ترین سطح شکست با ضریب اطمینان کمینه از میان تمام سطوح دارای پتانسیل شکست، سطحی است که از نقاط  $A$  و  $B$  می‌گذرد و مرکز آن بر روی خط  $D_1E_1$  قرار دارد. تعداد زیادی سطح شکست وجود دارد که در این شرایط صدق می‌کنند. برای کارآمدتر کردن جستجو، باید تنها قسمتی از خط که بین نقاط  $E_1$  و  $D_1$  قرار دارد، در نظر گرفته شود، از این رو مرکز بیشتر سطوح بحرانی شکست پیشنهادی، روی خط  $D_1E_1$  قرار می‌گیرد (شکل ۲)، (Husein Malkawi et al., 2001).

مرکز شکست بحرانی پیشنهادی با حرکت از نقطه  $E_1$  به سمت نقطه  $D_1$  و آزمون همه سطوح شکست ممکن به دست می‌آید. این مرکز نقطه‌ای با کمترین ضریب اطمینان است. پرش نیم مرحله‌ای (Half-step jumping) را نیز می‌توان برای به دست آوردن مرکز شکست بحرانی استفاده کرد. در این رابطه، بهینه‌سازی برای سطوح شکست با فرض نقطه  $O_1$  در وسط فاصله بین نقاط  $E_1$  و  $D_1$  به عنوان مرکز بحرانی آغاز می‌شود. مرحله بعد آزمون سطح شکست با مرکز  $O_2$  در وسط  $O_1$  و  $E_1$  است. اگر ضریب اطمینان کاهش یافت، با انجام نیم مرحله بعدی  $O_2$  به  $O_3$  تبدیل می‌شود و اگر نه  $O_2$  نیم مرحله به قبل باز می‌گردد (شکل ۳). این مرحله، فاصله میان مرکز بحرانی فرضی و نقاط  $D_1$  یا  $E_1$  برای مرحله اول است. در نتیجه، این رویه تا



### ۶- قانون اجرا

ناهماهنگی و تناقض عددی، مانند همگرایی ساختگی و مصنوعی به عنوان مهم ترین مشکل در استفاده از روش المانهای محدود برای جستجوی سطح بحرانی شکست است. مشکل همگرایی مصنوعی برای هر سطح شکستی که دارای شیب معکوس در نزدیکی پای پله است می تواند ایجاد شود.

Whitman & Bailey (1967) توصیه کرده اند که روش اصلاح شده بیشاپ در شرایطی که  $m_{ai} = (Cos \alpha I + Sin \alpha I * Tan \Phi I / F)$  کمتر از ۰/۲ در هر قطعه شود، با هوشیاری و دقت بیشتری مورد استفاده قرار گیرد. در غیر این صورت، همگرایی مصنوعی گریز ناپذیر خواهد بود و مشکلات محاسباتی در هنگام تعیین ضریب اطمینان رخ خواهد داد (Sarma, 1987).

سطوح شکستی را که مقدار  $-Tan \alpha Tan \Phi$  برای آنها بزرگ تر از واحد شود را نپذیرفت. Chowdhury and Zhang (1990) نشان دادند که برای پرهیز از همگرایی مصنوعی، ضریب اطمینان اولیه  $F_0$  باید  $I + \beta_1$  فرض شود که در آن  $\beta_1 = -Tan \alpha Tan \Phi$  است، در نتیجه، نیاز به رد کردن هیچ سطح شکستی نخواهد بود. Baker (1980) همگرایی ناشی از استفاده روش اسپنسر را شرح داد، نتایج معقول و مستدل زمانی به دست می آید که ضریب  $P_{ai} = Cos(\alpha_i - \delta) [I + Tan \Phi_i Tan(\alpha_i - \delta) / F] \geq a$ ، که مقدار  $a$  در محدوده بین ۰/۳ تا ۰/۴ پیدا خواهد شد.

در روش ارائه شده، هیچ سطح شکستی رد نخواهد شد و ضریب اطمینان اولیه  $F_0$ ، که در این رابطه استفاده خواهد شد، ضریب اطمینانی قراردادی است که از ضرب روش معمولی برشها در ۱/۲ به دست می آید (Bromhead, 1992). هر دو ضابطه مورد استفاده قرار می گیرد، به عبارت دیگر  $I + \beta_1$  و ضریب ضرب شونده ثابت ۱/۲، برای به دست آوردن همگرایی بدون رد شدن هیچ سطح شکست خاص است.

### ۷- مثالهای توضیح دهنده

برای آزمودن روش ارائه شده، برنامه رایانه ای به نام تحلیل پایداری شیب با استفاده از روش مونت کارلو توسعه یافته است. کارایی این روش با بررسی و مقایسه آن با روشهای تحلیلی پایداری شیب با استفاده از نرم افزار SlopeW از مجموعه Geoslope 2004 (GEO-SLOPE 2004) و روش عددی نرم افزار Flac4.0 از مجموعه Itasca (FLACV.4.0, 2002) بررسی و تحلیل شده است. در این مثالها، شیبهای نهایی معدن چادرمو بررسی و با سه روش ذکر شده مقایسه شده اند.

۱+ برای ادامه است؛ و  $Dx_A^k$  پهنای محدوده جستجو در مرحله  $k$ ام است، به گونه ای که پهنای محدوده اولیه مراحل جستجو  $Dx_A^0$ ،  $Dx_B^0$  ثابت بوده و از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$Dx_A^0 = \frac{(X_B^1 - X_A^1)}{2} \quad Dx_B^0 = \frac{(X_B^1 - X_A^1)}{2}$$

اگر این مرحله از جستجو برای نقطه A موفقیت آمیز بود (کاهش در ضریب اطمینان به دست آمد)، مرحله بعدی برای نقطه A ضرورتی ندارد (شکل ۵) و پهنای گام جستجو بر اساس رابطه زیر افزایش خواهد یافت:

$$Dx_A^{k+1} = Dx_A^k + |X_A^{k+1} - X_A^k|$$

اگر این مرحله از جستجو برای نقطه A موفقیت آمیز نبود، آنگاه پهنای گام جستجو برای مرحله بعدی،  $K+1$ ، بر اساس رابطه زیر کاهش می یابد:

$$Dx_A^{k+1} = \frac{Dx_A^k}{2}$$

فرایند تکرار برای نقطه A پایان می پذیرد و جابه جایی به نقطه B زمانی منتقل می شود که:

$$Dx_A^{k+1} < \Delta$$

$\Delta$  پهنای مجاز پایین تر برای محدوده جستجو است.

رویه مشابه برای A تطبیق داده شده است که با پیروی از B، کاهش بیشتری در ضریب اطمینان به وجود آید. زمانی که رویه تکراری در B متوقف شد، جستجو دوباره با حرکت به نقطه A و بررسی برای سطح بحرانی شکست ادامه خواهد یافت. این رویه به صورت متناوب بین نقطه A و B ادامه می یابد. سرانجام، کل رویه پایان پذیرفته و سطح شکست جاری،  $S_{k+1}$ ، به عنوان کمینه عمومی زمانی که معیارها و ضوابط زیر برقرار باشند، در نظر گرفته می شود (شکل ۶):

$$Dx_A k + 1 < \Delta \quad \text{و} \quad Dx_B k + 1 < \Delta \quad (1)$$

$$|F(Sk) - F(Sk + 1)| < \delta \quad (2)$$

که  $\delta$  ضریب تغییرات بین مقدار ضریب اطمینان در تکرار بعدی است و مقدار آن از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۰۱ در آخرین جستجو تغییر می کند. پارامتر  $\Delta$  در شرایط اندازه جرم قطعات در معادله زیر ثابت است (Husein Malkawi et al., 2001):

$$\Delta = (XBk - XAk) / 200 \quad (3)$$

## ۱-۷- محدوده‌های ژئوتکنیکی

معدن چادرملو با توجه به شرایط زمین‌شناسی پیچیده و زمین‌ساخت خاص و ترکیب اطلاعات به دست آمده از تحلیل پایداری دیواره‌های معدن به کمک روش‌های تجربی (RMR، MRMR و...)، حفر ۵ حلقه گمانه ژئوتکنیکی در محدوده نهایی گودال معدن (به طول ۱۰۴۹/۱۰ متر)، برداشت مغزه‌های حاصله (ثابت حدود ۱۳۰۰۰۰ مشخصه)، تهیه نمودار ژئوتکنیکی گمانه‌ها، نمونه‌گیری از مغزه‌ها و انجام آزمایش‌های مکانیکی سنگ و همچنین برداشتهای سطحی از دیواره‌ها، به ۵ محدوده ژئوتکنیکی مجزا بر اساس امتداد و جهت شیب، سنگ‌شناسی، ساختار، مشخصات ژئوتکنیکی و رده‌بندی توده سنگ تقسیم و مشخصات هر محدوده تعیین شد. در اینجا برای بررسی کارآیی روش ذکر شده به بررسی پایداری شیب در محدوده‌های ۱ و ۴ پرداخته شده است.

### الف) محدوده ۱ (دیواره‌های خاوری)

محدوده ۱ دیواره خاوری معدن را شامل می‌شود. در این محدوده، یک روباره سبتر آبرفتی با ژرفای ۳۰ متر بر روی سنگهای آذرین قرار گرفته است. ساختار این محدوده با یک زون برشی ژرف که ۴۵ درجه به سمت خاور شیب دارد و یک لایه‌بندی ضعیف کم‌ژرفا که هر دو دارای شیبی به سمت سطح‌اند، محدود شده و شکل پایداری را به وجود آورده‌اند. این زون مقاومت بسیار پایینی دارد (کانی کاوان شرق، ۱۳۸۵).

### ب) محدوده ۴ (دیواره‌های شمال باختری)

محدوده ۴ در شمال باختر پله نهایی تعریف شده است. این محدوده با سنگ‌شناسی متاسوماتیت، آلپیت متاسوماتیت و ماده معدنی محدود شده است. ساختار محدوده با جابه‌جایی زیاد و در برخی موارد سنگ آهک برشی مشخص شده است (کانی کاوان شرق، ۱۳۸۵).

## ۲-۷- پارامترهای ورودی برای طراحی ژئوتکنیکی محدوده‌ها

طراحی پارامترها برای محدوده‌های ژئوتکنیکی با ترکیب اطلاعات گمانه‌ها، برداشتهای سطحی و داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. برای محدوده‌های ۱ و ۴ در درون محوطه گودال معدن، در مجموع ۳ مقطع عرضی انتخاب شد. دو مقطع عرضی در محدوده ۱ تعیین شده‌اند که معرف تنوع محلی موجود بین شمال و جنوب محدوده‌اند. بررسی مقاطع با استفاده از پارامترهای ژئوتکنیکی هر محدوده که بازتاب‌کننده شرایط متغیر توده سنگ هستند، انجام شده است پارامترهای ورودی مدل‌سازی محدوده‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

## ۳-۷- روش‌های تحلیل

تحلیل پایداری شیبها با استفاده از نرم‌افزارهای SlopeW از مجموعه Geoslope 2004 (روش تحلیلی) و Flac 4.0 از مجموعه Itasca (روش عددی) انجام شده و با نتایج حاصل از نرم‌افزار نگارش یافته بر اساس روش بهینه‌سازی مونت کارلو مقایسه شده است.

همان‌گونه که ذکر شد، در این برنامه روش مونت کارلو از روش‌های بهینه‌سازی حذفی دیکوتوماس و گام تصادفی استفاده شده است. همچنین از ترکیب رابطه به دست آمده بین هندسه شیروانی، شیب و مختصات مرکز شکست احتمالی در یافتن محدوده جستجو در برنامه این روش استفاده شده و دیگر نیازی به وارد کردن محدوده جستجو توسط کاربر نیست. برای نگارش برنامه این روش، برنامه هریک از روش‌های ذکر شده مورد نگارش قرار گرفت. سپس برنامه هر روش با توجه به پروسه و روند روش مونت کارلو به ترتیب در حلقه برنامه قرار گرفت.

در برنامه روش پرش تصادفی، تعداد زیادی از سطوح احتمالی تصادفی تولید شده و هر سطح احتمالی بدون در نظر گرفتن سطوح احتمالی قبلی تولید می‌شود، اما در برنامه روش گام تصادفی، سطوح شکست به طور متوالی به گونه‌ای تولید می‌شوند که سطح شکست  $i+1$  با توجه به سطح شکست  $i$  ام تعریف می‌شود. در نتیجه یک سری بر آورد بهبود یافته نزدیک به کمینه با کمترین تکرار به دست می‌آید.

برنامه نگارش یافته این روش به دلیل استفاده از روش‌های تصادفی و بهینه‌سازی و ادغام منطقی این دو روش، ضمن این که سریع‌تر، آسان‌تر و با دقت بیشتری به تابع هدف (سطح بحرانی شکست و ضریب اطمینان کمینه عمومی) می‌رسد، از پیچیدگی بیشتری برخوردار است.

لازم به یادآوری است که Random Jumping همواره کمینه عمومی را نتیجه نمی‌دهد. این موضوع را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که هر سطح شکست تولید شده، بدون این که بهترین راه حل جاری بر آورد شود، آزموده می‌شود. در نتیجه کمینه محلی همواره به دست می‌آید. به عبارت دیگر، دیدگاه رویه Random Walking نتیجه بهتری را نسبت به Random Jumping ارائه می‌دهد و کمینه عمومی به دست می‌آید. در نتیجه، برنامه این روش ابتدا با رویه Random Jumping شروع شده و سپس به Random Walking تغییر روش داده می‌شود (Singiresu, 1996).

محاسبات Geoslope با استفاده از روش تعادل حدی و ضرایب ایمنی خروجی حاصل از روش تعادل گشتاوری Bishop اصلاح شده انجام شده است. بر اساس داده‌های مربوط به ساختارها و گمانه‌ها و در موارد ممکن مطابق با گمانه‌های ژئوتکنیکی (به عنوان دقیق‌ترین اطلاعات ژئوتکنیکی موجود)،

شدند و با تغییر شیب در هر مقطع تا رسیدن به ضریب ایمنی  $1/3$ ، شیب بهینه دیواره نهایی در محدوده‌های ۱ و ۴ تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به این تحلیلها مشخص شد که محدوده‌های ۱ شمالی و ۴ دارای ضریب ایمنی بیشتر از  $1/3$  و مقطع ۱ جنوبی ضریب ایمنی کمتر از  $1/3$  را دارا بودند (جدول ۳).

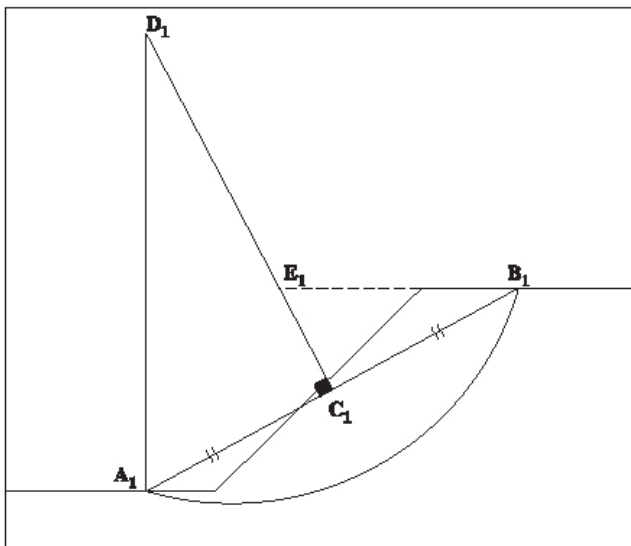
با توجه به نتایج تحلیلها که در جدول ۲ آورده شده است، مشخص می‌شود که اختلاف نتایج دو روش عددی و تحلیلی بسیار کم بوده و این اختلاف نیز ناشی از تفاوت منطق محاسباتی دو روش بوده و قابل پیش‌بینی است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، کارآیی روش مونت کارلو اثبات شده و همان گونه که قابل پیش‌بینی بود، نتایج حاصل از این روش با نتایج نرم افزار SlopeW همخوانی بیشتری دارد.

مقاطع عرضی منتخب به عنوان معرف هر یک از حوزه‌ها تهیه شده‌اند. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز برای واحدهای مختلف از مقادیر میانگین ویژگی مواد تعیین شده است. این مقادیر برای واحدهای خاکی مناسب نبوده و پارامترهای زون هوازده براساس داده‌های موجود برآورد شده است.

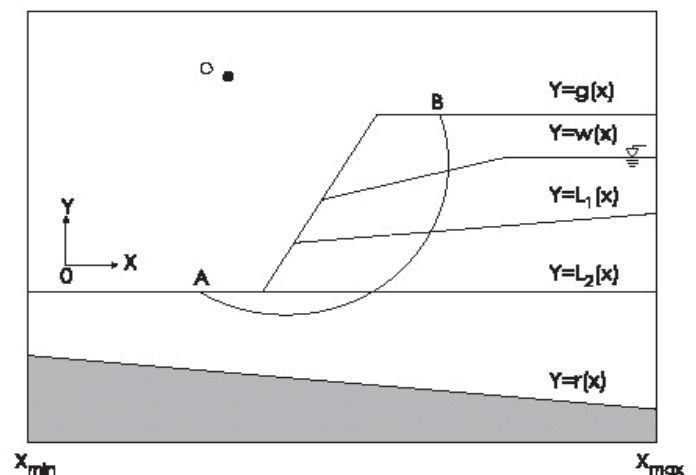
در شکل‌های ۷ تا ۱۲ مدل‌های شبیه سازی شده در نرم افزار GeoSlope و Flac4.0 برای محدوده‌های ۱ شمالی و جنوبی و محدوده ۴ ارائه شده است.

#### ۷-۴- نتیجه‌گیری

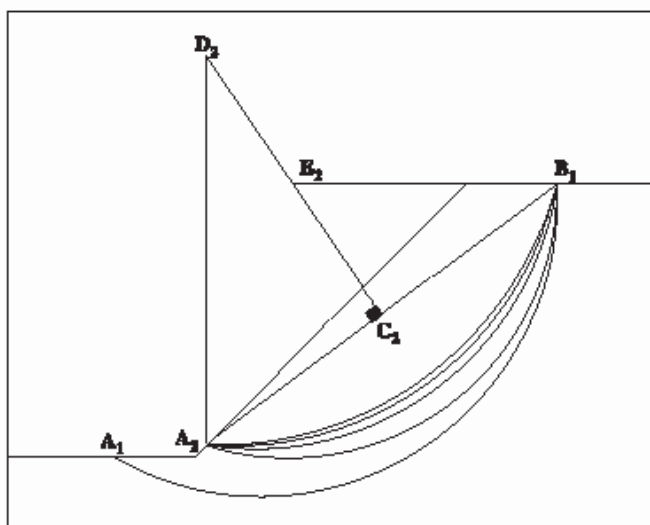
با استفاده از نرم‌افزار SlopeW, FLAC و نرم افزار نگارش یافته بر اساس روش بهینه‌سازی مونت کارلو، مقاطع تعیین شده در وضعیت فعلی تحلیل



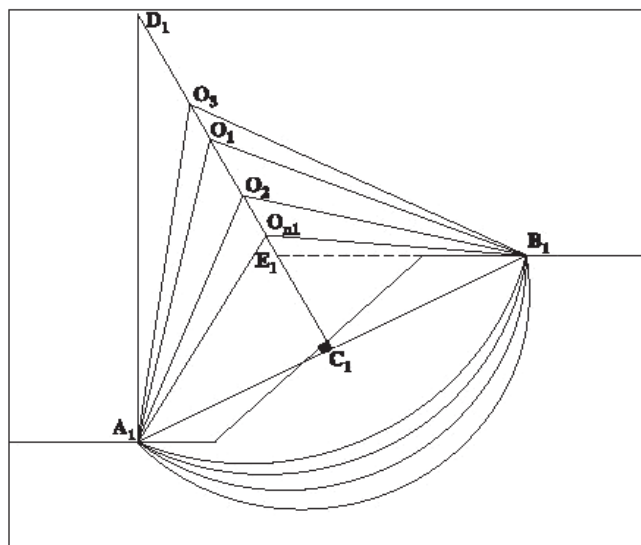
شکل ۲- تولید اولین سطح شکست احتمالی



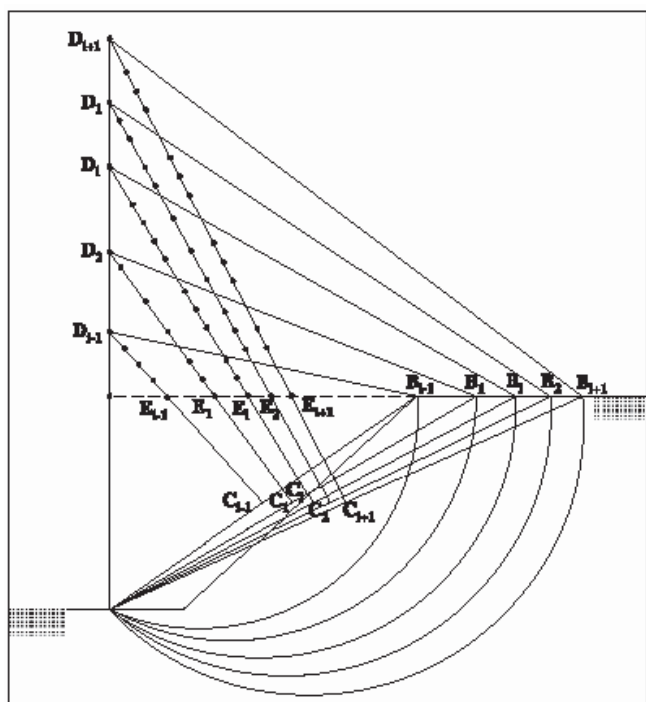
شکل ۱- نمایش مقطع یک شیب (سطح شکست دایره‌ای)



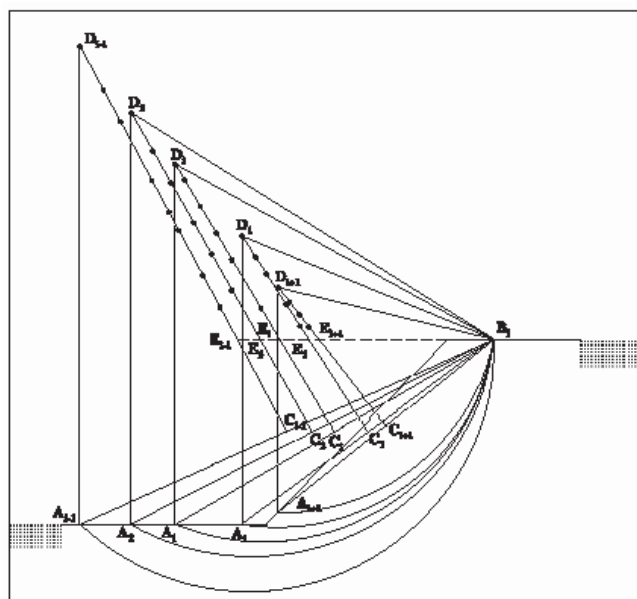
شکل ۴- جابه‌جایی نقطه A از مرحله اول به مرحله دوم



شکل ۳- جستجوی سطح بحرانی در مرحله اول

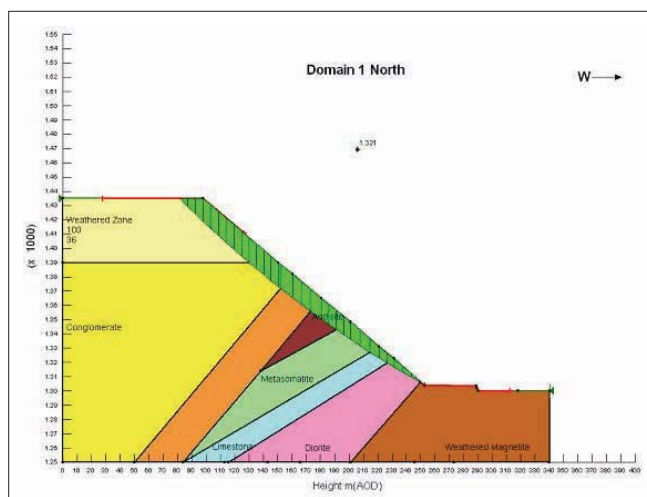


شکل ۶- رویه تکرارشونده برای نقطه B

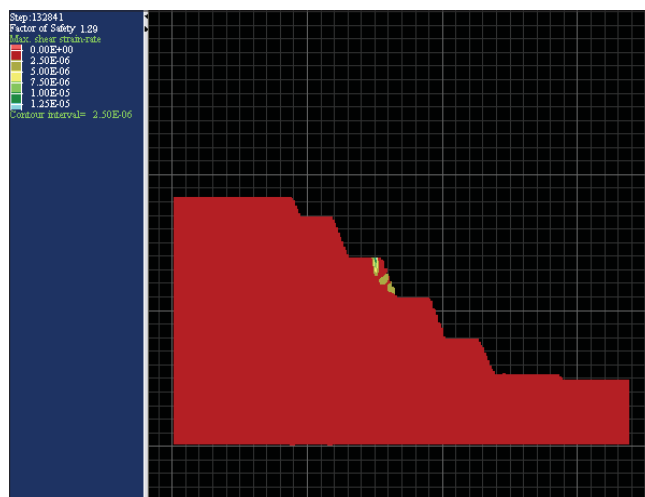


شکل ۵- رویه تکرارشونده برای نقطه A

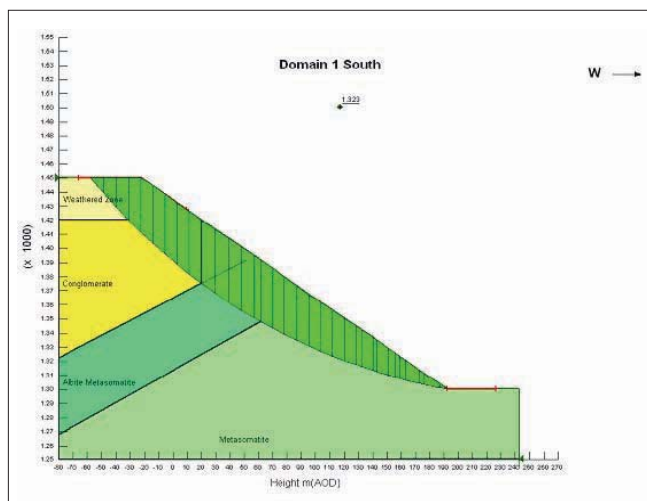




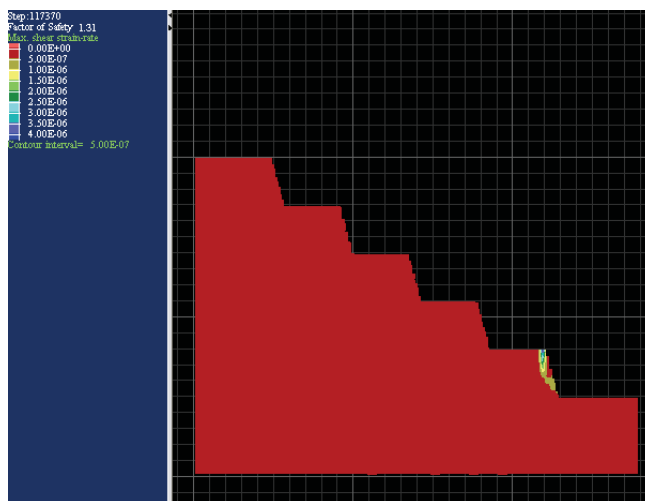
شکل ۸- ضریب ایمنی محدوده ۱ شمالی در شیب ۴۰ درجه با استفاده از نرم افزار SlopeW



شکل ۷- ضریب ایمنی محدوده ۱ شمالی در شیب ۴۰ درجه با استفاده از نرم افزار FLAC

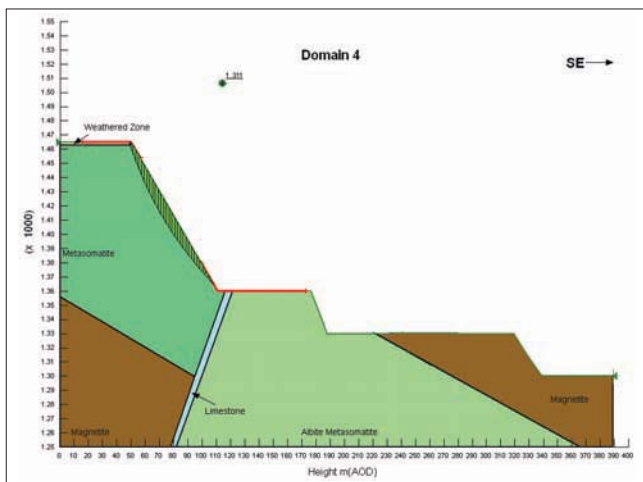


شکل ۱۰- ضریب ایمنی محدوده ۱ جنوبی در شیب ۴۰ درجه با استفاده از نرم افزار SlopeW

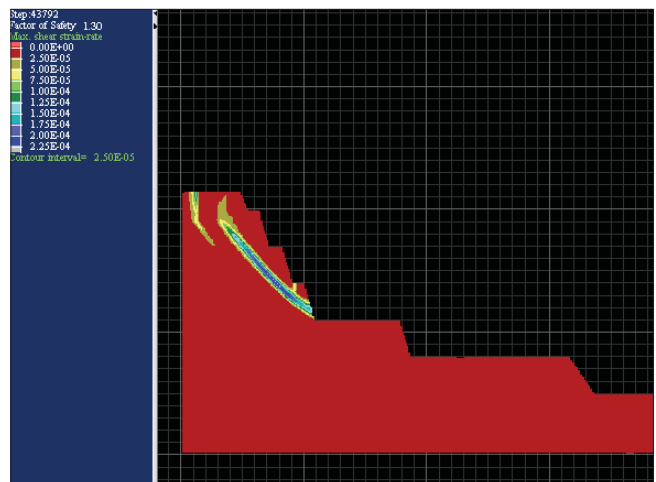


شکل ۹- ضریب ایمنی محدوده ۱ جنوبی در شیب ۴۰ درجه با استفاده از نرم افزار FLAC





شکل ۱۲- ضریب ایمنی محدوده ۴ در شیب ۶۰ درجه با استفاده از نرم افزار SlopeW



شکل ۱۱- ضریب ایمنی محدوده ۴ در شیب ۶۰ درجه با استفاده از نرم افزار FLAC

جدول ۱- اطلاعات ورودی مدل سازی محدوده های ژئوتکنیکی گودال معدن چادرملو (کانی کاوان شرق، ۱۳۸۱ و ۱۳۸۵)

محدوده / لستولوژی	$m_i$	$D$	وزن مخصوص ( $KN/m^3$ )	$UCS$ ( $MPa$ )	انحراف از معیار $UCS$	$GSI$	انحراف از معیار $GSI$	جسبندگی ( $KPa$ )	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته ( $GPa$ )	ضریب بواسون
محدوده ۱											
زون هوازده			۲۲					۱۰۰	۲۶	۲	۰/۲۵
زون گسل	۱۹	۱	۲۲	۱۲	۱۴	۱۴	۱۳	۲۶	۲۷	۳	۰/۲۵
کنگلوмера	۲۱	۱	۲۲	۳۶	۴۲	۳۰	۹	۱۰۰	۳۸	۱۴	۰/۲۸
آندزیت	۲۸	۱	۲۴	۴۹	۱۸	۲۸	۲۷	۱۱۸	۲۹	۵۸	۰/۳۱
مناسومانیت	۲۴	۱	۲۶	۶۳	۳۱	۳۸	۱۲	۱۸۹	۴۰	۵۹	۰/۲۶
سنگ آهک	۱۰	۱	۲۴	۶۰	۲۷	۳۴	۷	۱۱۸	۴۱	۵۰	۰/۲۵
دیوریت	۲۵	۱	۲۸	۴۵	۲۰	۴۲	۱۰	۲۸۴	۴۲	۴۲	۰/۲۵
زون برشی	۳۲	۱	۳۷	۷	۳۳	۳۳	۲۵	۶۲	۴۳	۲	۰/۲۴
آلبیت مناسومانیت	۲۴	۱	۲۶	۲۹	۴۶	۲۱	۲۳	۷۱	۴۴	۳۰	۰/۲۵
محدوده ۴											
زون هوازده			۲۲					۱۰۰	۲۶	۲	۰/۲۵
سنگ آهک	۱۰	۱	۲۴	۶۰	۲۷	۳۴	۷	۱۱۸	۲۲	۵۰	۰/۲۵
مناسومانیت	۲۴	۱	۲۸	۹۵	۵۹	۳۸	۸	۲۲۷	۴۴	۶۲	۰/۲۶
آلبیت مناسومانیت	۲۵	۱	۲۷	۷۲	۲۰	۴۳	۹	۲۵۱	۴۶	۲۹	۰/۲۵
مگنیتیت	۳۲	۱	۳۷	۱۰۶	۵۸	۴۶	۱۲	۶۲۷	۵۹	۶۵	۰/۲۶

جدول ۲- مقایسه شرایط فعلی و شبیه‌های پیشنهادی در هر محدوده

ضرب ایمنی شیب کلی (درجه)						نرم افزار	محدوده
شیب ۶۰	شیب ۵۵	شیب ۵۰	شیب ۴۵	شیب ۴۰	شیب ۳۵		
—	—	—	—	۱/۲۹۰	—	Flac	محدوده ۱ (شمال)
—	—	—	—	۱/۳۲۱	۱/۶۳۷	SlopeW	
—	—	—	—	۱/۳۲۵	۱/۶۴۵	Mont Carlo	
—	—	—	—	۱/۳۱۰	—	Flac	محدوده ۱ (جنوب)
—	—	—	۱/۰۷۹	۱/۳۲۳	۱/۴۸۸	SlopeW	
—	—	—	۱/۱۱۲	۱/۳۳۹	۱/۵۱۵	Mont Carlo	
۱/۳۰۰	—	—	—	—	—	Flac	محدوده ۴
۱/۳۱۱	۱/۴۵۰	۱/۵۱۸	—	—	—	SlopeW	
۱/۳۱۹	۱/۴۶۲	۱/۵۲۹	—	—	—	Mont Carlo	

جدول ۳- زوایای شیب سراسری پیشنهادی برای معدن چادرملو

زاویه شیب پیشنهادی (درجه)	زاویه شیب فعلی (درجه)	محدوده
۴۰	۳۷	محدوده ۱ (شمال)
۴۰	۴۸	محدوده ۱ (جنوب)
۶۰	۵۲	محدوده ۴

**کتابنگاری**

- کانی کاوان شرق، شرکت مهندسی، ۱۳۸۱- گزارش مطالعات مقدماتی پایداری دیواره‌های معدن سنگ آهن چادرملو (فاز I).
- کانی کاوان شرق، شرکت مهندسی، ۱۳۸۵- گزارش مطالعات پایداری شیب دیواره‌های نهایی معدن سنگ آهن چادرملو (فاز II).

**References**

- Baker, R., 1980- «Determination of the critical slip surface in slope stability computations», *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 4: 333–359.
- Bishop, A.W., 1955- «The use of slip circle in the stability analysis of slopes», *Géotechnique*, 5: 7–17.
- Bromhead, E.N., 1992- «The stability of slopes», 2nd ed. Blackie Academic & Professional, London.
- Celestino, T.B. & Duncan, J.M., 1981- «Simplified search for noncircular slip surface» In *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, pp. 391–394.
- Chen, Z.-Y., 1992- «Random trials used in determining global minimum factors of safety of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 29: 225–233.
- Cherubini, C. & Greco, V.R., 1987- «A probabilistic method for locating the critical slip surface in slope stability analysis» In *Proceedings of the 5th International Conference on Applications of Probability and Statistics in Soil and Structural Engineering*, Vancouver, B.C., Canada. Published as *Reliability and Risk in Civil Engineering*, Vol. 2, pp. 1182–1187.
- Chowdhury, R.N. & Zhang, S., 1990- «Convergence aspect of limit equilibrium methods for slopes», *Canadian Geotechnical Journal*, 27: 145–151.
- De Natale, J.S., 1991- «Rapid identification of critical slip surface: structure» *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(10): 1568–1589.
- FLAC V. 4.0, 2002- ITASCA Inc.
- GEO-SLOPE 2004- SLOPEW Manual.
- Gillett, S.G., 1987- «An examination of search routines used in slope stability analysis», M.Sc. thesis, University of Arizona, Tucson, Ariz.
- Greco, V.R., 1996- «Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface», *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(7): 517–525.
- Husein Malkawi, A.I., Hassan, W.F. & Sarma, S.K., 2001- «An efficient search method for finding the critical circular slip surface using the Monte Carlo technique», *NRC. Canada Geotech.J.*: 1081-1087.
- Janbu, N., 1954- «Application of composite slip surface for stability analysis», In *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*, Stockholm, Sweden, pp. 43–49.
- Janbu, N., 1973- «Slope stability computations. In *Embankment dam engineering*», Casagrande Memorial Volume. Edited by E. Hirschfield and S. Poulos. John Wiley, New York, pp. 47–86.
- Li, K.S. & White, W., 1987- «Rapid evaluation of the critical slip surface in slope stability problems», *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11: 449–473.



- Morgenstern, N.R. & Price, V.E., 1965- «The analysis of stability of general slip surface», *Géotechnique*, 15: 79–93.
- Sarma, S.K., 1973- «Stability analysis of embankments and slopes», *Géotechnique*, 23(3): 423–433.
- Sarma, S.K., 1979- «Stability analysis of embankments and slopes», *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105(12): 1511–1524.
- Sarma, S.K., 1987- «A note on the stability analysis of slopes», *Géotechnique*, 37: 107–111.
- Siegel, R.A., Kovacs, W.D. and Lovell, C.W., 1981- «Random surface generation in stability analysis», *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107(7): 996–1002.
- Singiresu, S. Rao, 1996- «Engineering Optimization: Theory and Practice», 3rd Edition, Wiley.
- Spencer, E.E., 1967- «A method of the analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces», *Géotechnique*, 17: 11–26.
- Spencer, E.E., 1973- «The thrust line criterion in embankment stability analysis», *Géotechnique*, 23: 85–100.
- Whitman, R.V. & Bailey, W.A., 1967- «Use of computers for slope stability analysis», *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, 93(SM4): 475–498.