استفاده از روش مونت‌کارلو ترکیبی برای یافتن سطح بحرانی شکست در شیروانیها

نوشته: 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*

*Departement of Mining Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

تاریخ دریافت:۱۳۸۵/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۰۲/۰۹

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 نرم‌افزارها، از روشهای جستجوی بی‌اعتبار و غیرقابل اطمینان استفاده شده است. در این مقاله، از روش مونت‌کارلو 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

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

Archive of SID
www.SID.ir

برای یافتن سطح بحرانی شکست استفاده کرده‌اند. Gillett (1987) پس از بررسی تعداد زیادی از نرم‌افزارهای 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 براین، 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).

Li & White (1987) , Celestino&Duncan (1981) از روش متغیر 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 بهبودیافته 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 شیروانیها، 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.

۲- جستجوی سطح بحرانی شکست دایره‌ای

در این روش، برای یافتن سطوح شکست بحرانی شیروانیها، 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، مرگنسترن 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 (Xmin,Xmax) اطلاعات ورودی این نرم‌افزار هستند.

۳- فرموله‌کردن مسئله

مسئله را می‌توان به‌صورت 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 $y=L_j(x)$, $y=w(x)$, $y=g(x)$ و $y=r(x)$ 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:

$$S=[X_A, Y_A, X_B, Y_B, X_O, Y_O] \qquad (۱)$$

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:

$$\begin{aligned} &Min \quad F(S) \\ &s.t. \quad X_{\min} \le X \le X_{\max} \\ &X_{\min} \le X_A \le \frac{X_{\max}+X_{\min}}{2} \\ &\frac{X_{\max}+X_{\min}}{2} \le X_B \le X_{\max} \\ &Y_A = g(X_A) \\ &Y_B = g(X_B) \\ &X_A < X_B \end{aligned} \qquad (۲)$$

Archive of SID
www.SID.ir

۴- حل مسئله

برای حل مسئله اولین سطح شکست توسط سه نقطه B_1، A_1 و D_1 بر اساس شکل ۲ در محدوده (Xmin, Xmax) تعریف می شود. نقاط A_1 و B_1 را می‌توان به صورت تصادفی به شکل زیر ایجاد کرد:

مختصات نقطه A_1:
$$X^1_{A_1} = X_{\min} + R_1.\frac{(X_{\max} - X_{\min})}{2} \qquad Y^1_{A_1} = g\left(X^1_A\right)$$

مختصات نقطه B_1:
$$X^1_{B_1} = X_{\max} - R_2.\frac{(X_{\max} - X_{\min})}{2} \qquad Y^1_{B_1} = g\left(X^1_B\right)$$

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:

مختصات نقطه C_1:
$$X_{C_1} = \frac{X_{A_1} + X_{B_1}}{2} \qquad Y_{C_1} = \frac{Y_{A_1} + Y_{B_1}}{2}$$

مختصات نقطه D_1:
$$X_{D_1} = X_{A_1}$$

نقطه E_1، از تقاطع خط گسترش یافته $Y=Y_{B1}$ و خط C_1D_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، درنظر گرفته شود، از این‌رو مرکز بیشتر سطوح بحرانی شکست پیشنهادی، روی خط D_1E_1 قرارمی‌گیرد (شکل ۲)، (Husein Malkawi et al.,2001).
مرکز شکست بحرانی پیشنهادی با حرکت از نقطه E_1 به سمت نقطه D_1 و آزمودن همهٔ 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 آزمودن 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 وگرنه O_2 نیم مرحله به قبل باز می‌گردد (شکل۳). این مرحله، فاصله میان مرکز بحرانی فرضی و نقاط D_1 یا E_1 برای مرحله اول است. درنتیجه، این رویه تا 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 می گذرد 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:
$$F(S^1) > F(S^2) > F(S^3) \ldots > F(S^k) > F(S^{k+1}) \ldots$$

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

$$F(S^1) = \begin{bmatrix} X^1_A & Y^1_A & X^1_B & X^1_B & Y^1_B & X^1_{O_1} & Y^1_{O_1} \\ X^1_A & Y^1_A & X^1_B & X^1_B & Y^1_B & X^1_{O_2} & Y^1_{O_2} \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ X^1_A & Y^1_A & X^1_B & X^1_B & Y^1_B & X^1_{O_{n1}} & Y^1_{O_{n1}} \end{bmatrix}$$

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

$$F(S^k) = \begin{bmatrix} X^k_A & Y^k_A & X^k_B & X^k_B & Y^k_B & X^k_{O_1} & Y^k_{O_1} \\ X^k_A & Y^k_A & X^k_B & X^k_B & Y^k_B & X^k_{O_2} & Y^k_{O_2} \\ & & & & & & \\ & & & & & & \\ X^k_A & Y^k_A & X^k_B & X^k_B & Y^k_B & X^k_{O_{nk}} & Y^k_{O_{nk}} \end{bmatrix}$$

n_1، n_2، ... و 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 $\left(X^k_A, X^k_B\right)$ مطابق شکل ۴ به طور تصادفی به نقطه $\left(X^{k+1}_A, X^{k+1}_B\right)$ انتقال می‌یابد که:

$$X^{K+1}_A = X^k_A + \xi^k_A \qquad Y^{k+1}_A = g\left(X^{k+1}_A\right)$$

که ξ^k_A جابه‌جایی تصادفی بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:
$$\xi^k_A = N_X.R_X.Dx^k_A$$

که R_X عددی تصادفی است که از جمعیت یکنواخت پخش شده در محدوده (۰/۵ ، ۰/۵-) استخراج می‌شود؛ N_X عددی است که جهت جابه‌جایی نقاط A و B را کنترل می کند و دارای مقادیر ۱- برای برگشت و

Archive of SID

www.SID.ir

۱+ برای ادامه است؛ و Dx_A^k پهنای محدوده جستجو در مرحله kام است، به گونه‌ای که پهنای محدوده اولیه مراحل جستجو Dx_A^o ، Dx_B^o ثابت بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

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

اگر این مرحله از جستجو برای نقطه A موفقیت آمیز بود (کاهش در ضریب اطمینان به‌دست آمد)، مرحله بعدی برای نقطه A ضرورتی ندارد (شکل۵) و پهنای گام جستجو بر اساس رابطه زیر افزایش خواهد یافت:

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

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

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

فرایند تکرار برای نقطه A پایان می‌پذیرد و جابه‌جایی به نقطه B زمانی متقل می‌شود که: $Dx_A^{k+1} < \Delta$

Δ پهنای مجاز پایین‌تر 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. زمانی‌که رویه تکراری درB متوقف شد، جستجو دوباره با حرکت به نقطه A و بررسی برای سطح بحرانی شکست ادامه خواهد یافت. این رویه به‌صورت متناوب بین نقطه A و B ادامه می‌یابد. سرانجام، کل رویه پایان پذیرفته و سطح شکست جاری، S_{k+1} ، به عنوان کمینه عمومی زمانی‌که معیارها و ضوابط زیر برقرار باشند، درنظرگرفته می‌شود (شکل ۶) :

$$D_X Ak+1 \langle \Delta \quad و \quad D_X Bk+1 \langle \Delta \qquad (۱)$$

$$\left| F(Sk) - F(Sk+1) \right| \langle \delta \qquad (۲)$$

کهδ ضریب تغییرات بین مقدار ضریب اطمینان در تکرار بعدی است و مقدار آن از ۰/۰۰۱ در اولین جستجو تا ۰/۰۰۰۰۱ در آخرین جستجو تغییر می‌کند. پارامتر Δ درشرایط اندازه جرم قطعات درمعادله زیر ثابت است (Husein Malkawi et al.,2001):

$$\Delta = (XBk - XAk) / 200 \qquad (۳)$$

۶– قانون اجرا

ناهماهنگی و تناقض عددی، مانند همگرایی ساختگی و مصنوعی به عنوان مهم‌ترین 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 می‌تواند ایجاد شود.

Whitman & Bailey (1967) توصیه کرده‌اند که روش اصلاح شده بیشاپ در شرایطی که $m_{\alpha i} = (Cos\ \alpha I + Sin\ \alpha I * Tan\ \Phi I / F)$ کمتر از ۰/۲ در هر قطعه شود، با هوشیاری و دقت بیشتری مورد استفاده قرارگیرد. درغیر این‌صورت، همگرایی مصنوعی گریز ناپذیرخواهد 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 بزرگ‌تر از واحد شود را نپذیرفت. Chowdhury and Zhang (1990) نشان دادند که برای پرهیزاز همگرایی مصنوعی، ضریب اطمینان اولیه F_0 باید $1+\beta_1$ فرض شود که در آن $\beta_1 = -Tan\ \alpha\ Tan\ \Phi$ است، در نتیجه، نیاز به ردکردن هیچ سطح شکستی نخواهد بود.(1980) Baker همگرایی ناشی از استفاده روش اسپنسر را شرح داد، نتایج معقول و مستدل زمانی به دست می‌آید که ضریب $P_{\alpha i} = Cos\ (\alpha_I - \delta)\ [1 + Tan\ \Phi_I\ Tan\ (\alpha_I - \delta) / F] >= a$ ، 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 به‌دست می‌آید (Bromhead,1992). هردو ضابطه مورد استفاده قرار می‌گیرد، به عبارت دیگر $1+\beta_1$ 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 رایانه‌ای به نام تحلیل پایداری شیب با استفاده از روش مونت کارلو توسعه یافته است. کارآیی این روش با بررسی و مقایسه آن با روشهای تحلیلی پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزار SlopeW از مجموعه Geoslope 2004 (GEO-SLOPE 2004) و روش عددی نرم‌افزار Flac4.0 از مجموعه Itasca (FLACV.4.0,2002) بررسی و تحلیل شده است.

در این مثالها، شیبهای نهایی معدن چادرملو بررسی و با سه روش ذکرشده مقایسه شده‌اند.

Archive of SID
www.SID.ir

۷-۱- 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 (MRMR، RMR و ...)، حفر ۵ حلقه گمانه ژئوتکنیکی در محدوده نهایی گودال معدن(به طول ۱۰۴۹/۱۰ متر)، برداشت مغزه‌های حاصله (ثبت حدود ۱۳۰۰۰۰ مشخصه)، تهیه نمودار ژئوتکنیکی گمانه‌ها، نمونه‌گیری از مغزه‌ها و انجام آزمایشهای مکانیکی‌سنگ 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 ذکرشده به بررسی پایداری شیب در محدوده‌های ۱ و ۴ پرداخته شده‌است.

الف) محدوده ۱ (دیواره‌های خاوری)

محدوده ۱ دیواره خاوری معدن را شامل می‌شود. در این محدوده، یک روباره ستبر آبرفتی با ژرفای ۳۰ متر بر روی سنگهای آذرین قرار گرفته است. ساختار این محدوده با یک زون برشی ژرف که۴۵ درجه به‌سمت خاور شیب دارد و یک لایه‌بندی ضعیف کم‌ژرفا که هر دو دارای شیبی به سمت سطح‌اند، محدود شده و شکل پایداری را به‌وجود آورده‌اند. این زون مقاومت بسیار پایینی دارد(کانی‌کاوان‌شرق، ۱۳۸۵).

ب) محدوده ۴ (دیواره‌های شمال‌باختری)

محدوده ۴ در شمال باختر پله نهایی تعریف شده‌است. این محدوده با سنگ‌شناسی متاسوماتیت، آلبیت متاسوماتیت و ماده‌معدنی محدود شده است. ساختار محدوده با جابه‌جایی زیاد و در برخی موارد سنگ آهک برشی مشخص شده است (کانی‌کاوان‌شرق،۱۳۸۵).

۷-۲- پارامترهای ورودی برای طراحی ژئوتکنیکی محدوده‌ها

طراحی پارامترها برای محدوده های 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.

۷-۳- 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 بهینه سازی مونت کارلو مقایسه شده است.

همان گونه که ذکرشد، 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 محدوه جستجو توسط کاربر نیست.

برای نگارش برنامه این روش، برنامه هریک از روشهای ذکرشده مورد نگارش قرارگرفت. سپس برنامه هر روش با توجه به پروسه و روند روش مونت‌کارلو به‌ترتیب در حلقه برنامه قرارگرفت.

در برنامه روش پرش تصادفی، تعداد زیادی از سطوح احتمالی تصادفی تولید شده و هر سطح احتمالی بدون درنظر 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+1ام با توجه به سطح شکست iام تعریف می‌شود. درنتیجه یک سری بر آورد بهبودیافته نزدیک به کمینه با کمترین تکرار به دست می‌آید.

برنامه نگارش یافته این روش به‌دلیل استفاده از روشهای تصادفی و بهینه‌سازی و ادغام منطقی این دو روش، ضمن این‌که 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 برآورد شود، آزموده می‌شود. درنتیجه کمینه محلی همواره به‌دست می‌آید. به عبارت دیگر، دیدگاه رویه Random Walking نتیجه بهتری را نسبت به Random Jumping ارائه می‌دهد و کمینه عمومی به دست می‌آید. درنتیجه، برنامه این روش ابتدا با رویه Random Jumping شروع شده و سپس به Random Walking تغییر روش داده می‌شود (Singiresu ,1996).

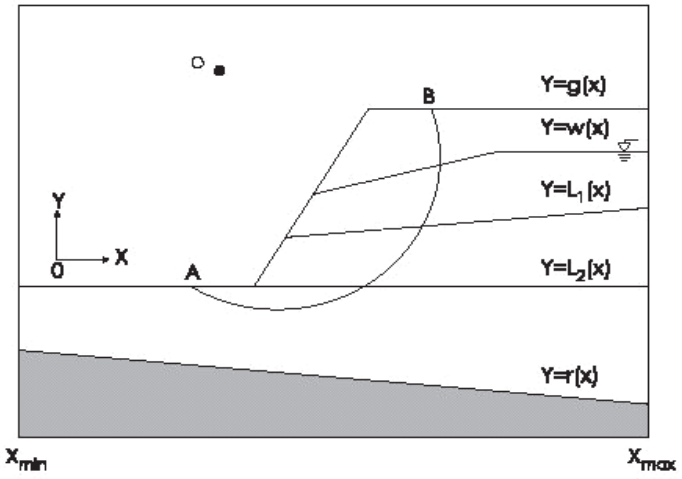
محاسبات GeoSlopeبا استفاده از روش تعادل حدی و ضرایب ایمنی خروجی حاصل از روش تعادل گشتاوری Bishop اصلاح شده انجام شده است. بر اساس داده‌های مربوط به ساختارها و گمانه‌ها و در موارد ممکن مطابق با گمانه‌های ژئوتکنیکی (به عنوان دقیق‌ترین اطلاعات ژئوتکنیکی موجود)،

Archive of SID
www.SID.ir

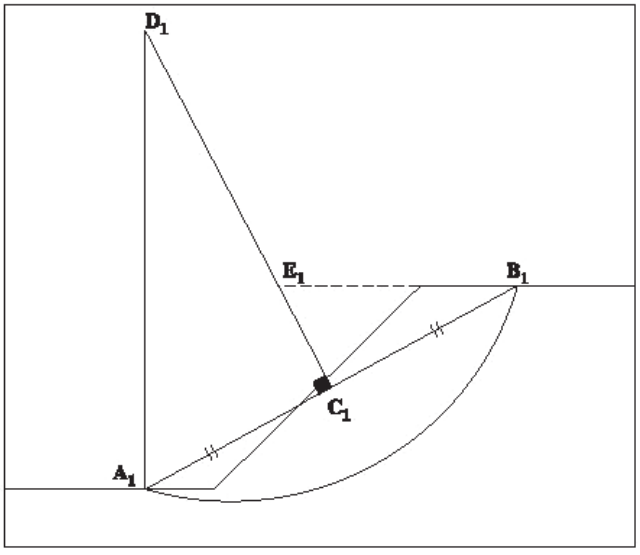
مقاطع عرضی منتخب به عنوان معرف هر یک از حوزه‌ها تهیه شده‌اند.
چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز برای واحدهای مختلف از مقادیر میانگین ویژگی مواد تعیین شده است. این مقادیر برای واحدهای خاکی مناسب نبوده و پارامترهای زون هوازده براساس داده‌های موجود برآورد شده است.
در شکلهای ۷ تا۱۲ مدلهای شبیه سازی شده در 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 FLAC , SlopeW و نرم افزار نگارش یافته بر اساس روش بهینه‌سازی مونت کارلو، مقاطع تعیین شده در وضعیت فعلی تحلیل شدند و با تغییر شیب در هر مقطع تا رسیدن به ضریب ایمنی ۱/۳، شیب بهینه دیواره نهایی در محدوده‌های ۱ و ۴ تعیین شد که نتایج آن در جدول۲ آورده شده است. با توجه به این تحلیلها مشخص شد که محدوده‌های ۱ شمالی و ۴ دارای ضریب ایمنی بیشتر از ۱/۳ و مقطع ۱ جنوبی ضریب ایمنی کمتر از ۱/۳ را دارا بودند (جدول ۳).
با توجه به نتایج تحلیلها که در جدول۲ 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.

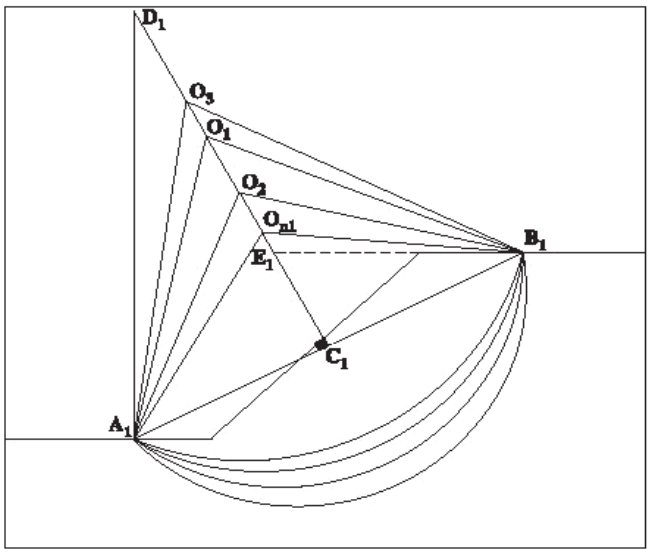


شکل ۱- نمایش مقطع یک شیب (سطح شکست دایره‌ای)

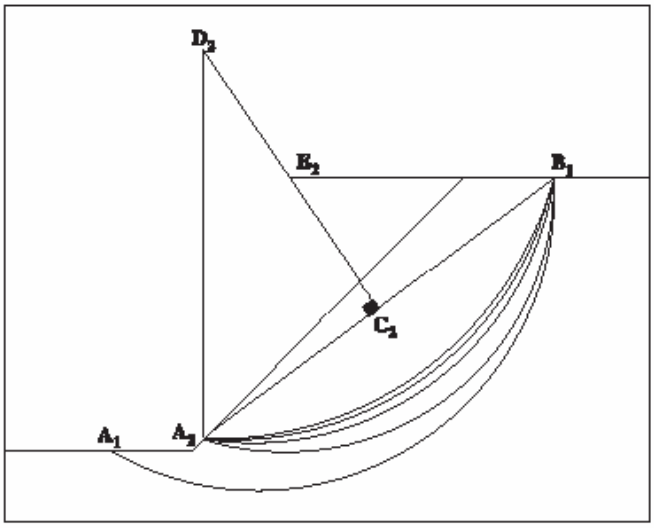


شکل ۲- تولید اولین سطح شکست احتمالی

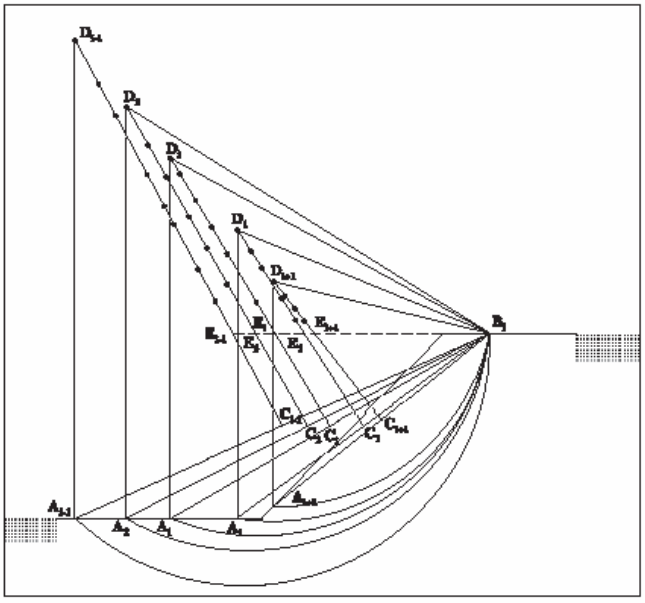
Archive of SID
www.SID.ir



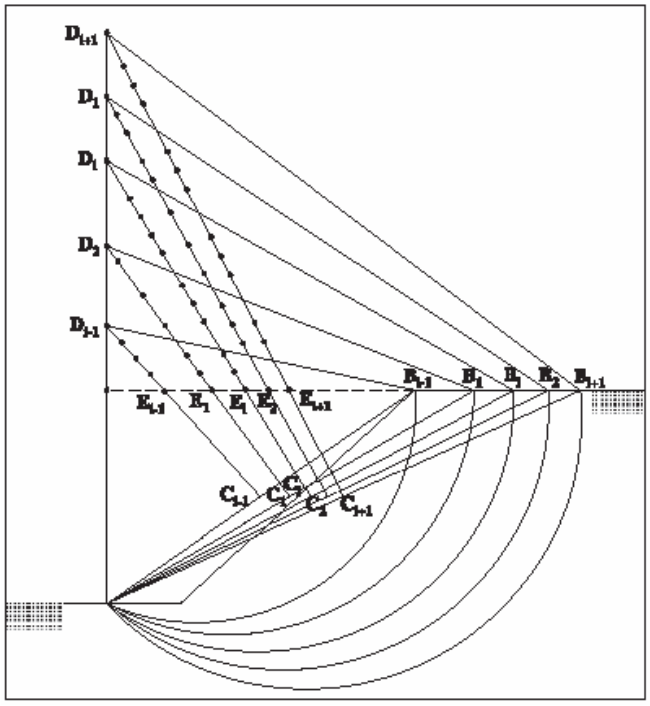
شکل۳- جستجوی سطح بحرانی در مرحله اول



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

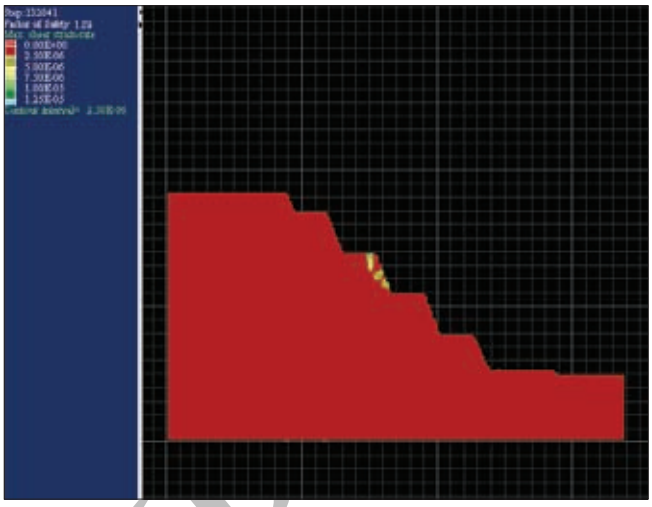


شکل ۵- رویه تکرارشونده برای نقطه A

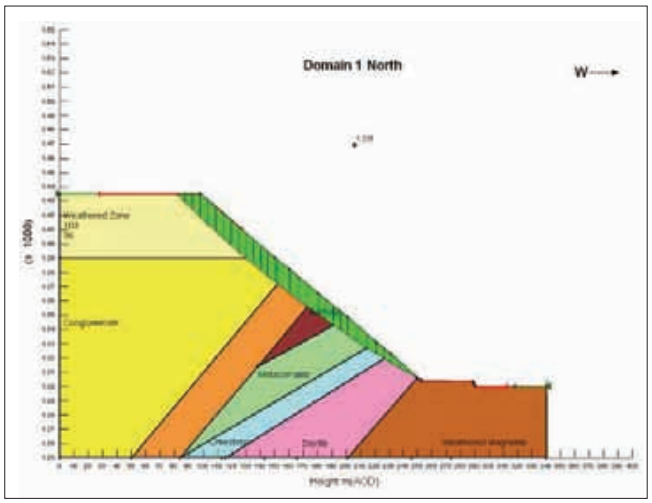


شکل ۶- رویه تکرارشونده برای نقطه B

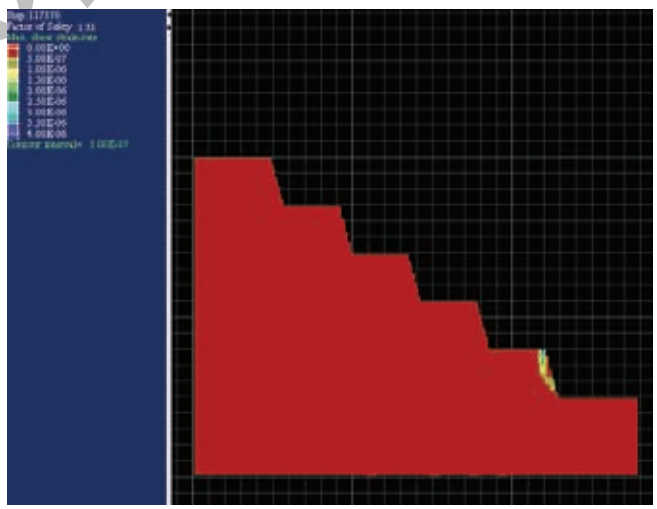
www.SID.ir



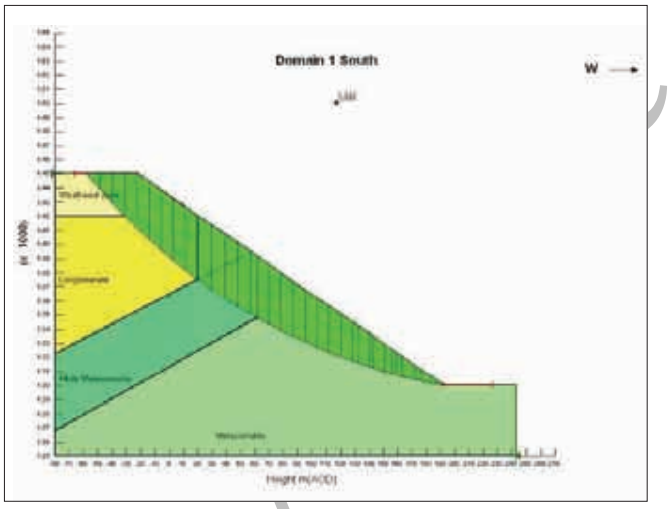
شکل ۷- ضریب ایمنی محدوده ۱ شمالی در شیب ۴۰ درجه
با استفاده از نرم‌افزار FLAC



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

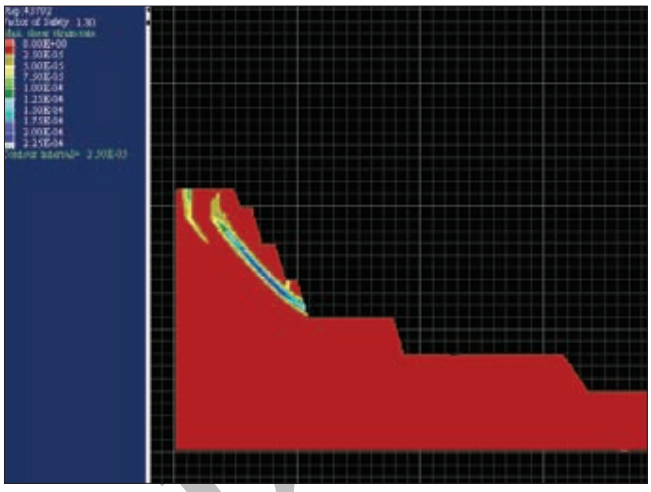


شکل ۹- ضریب ایمنی محدوده ۱ جنوبی در شیب ۴۰ درجه
با استفاده از نرم‌افزار FLAC

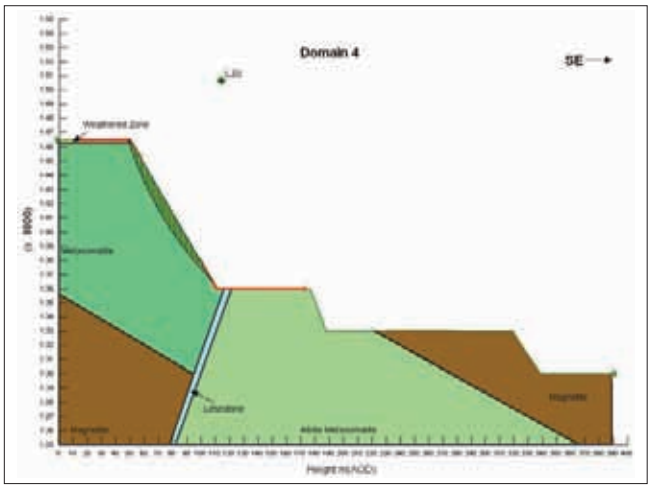


شکل ۱۰- ضریب ایمنی محدوده ۱ جنوبی در شیب ۴۰ درجه با استفاده از
نرم‌افزار SlopeW

www.SID.ir



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



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

جدول ۱- اطلاعات ورودی مدل‌سازی محدوده‌های ژئوتکنیکی گودال معدن چادرملو(کانی‌کاوان‌شرق، ۱۳۸۱و ۱۳۸۵)

محدوده/ لیتولوژی	m_i	D	وزن مخصوص (KN/m^3)	UCS (MPa)	انحراف از معیار UCS	GSI	انحراف از معیار GSI	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون
محدوده ۱											
زون هوازده			۲۲					۱۰۰	۳۶	۲	۰/۲۵
زون گسل	۱۹	۱	۲۲	۱۲	۱۴	۱۴	۱۳	۲۶	۳۷	۳	۰/۲۵
کنگلومرا	۲۱	۱	۲۲	۳۶	۴۲	۳۰	۹	۱۰۰	۳۸	۱۴	۰/۲۸
آندزیت	۲۸	۱	۲۴	۴۹	۱۸	۲۸	۲۷	۱۱۸	۳۹	۵۸	۰/۳۱
متاسومانیت	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	۴۳	۰/۲۵
زون برشی	۳۲	۱	۳۷	۷	۳۳	۲۳	۲۵	۶۲	۴۳	۲	۰/۲۴
آلبیت متاسومانیت	۲۴	۱	۲۶	۲۹	۴۶	۲۱	۲۳	۷۱	۴۴	۳۰	۰/۲۵
محدوده ۴											
زون هوازده			۲۲					۱۰۰	۳۶	۲	۰/۲۵
سنگ آهک	۱۰	۱	۲۴	۶۰	۲۷	۳۴	۷	۱۱۸	۳۲	۵۰	۰/۲۵
متاسومانیت	۲۴	۱	۲۸	۹۵	۵۹	۳۸	۸	۲۳۷	۴۴	۶۲	۰/۲۶
آلبیت متاسومانیت	۲۵	۱	۲۷	۷۲	۲۰	۴۳	۹	۲۵۱	۴۶	۲۹	۰/۲۵
مگنتیت	۳۲	۱	۳۷	۱۰۶	۵۸	۴۶	۱۲	۶۳۷	۵۹	۶۵	۰/۲۶

www.SID.ir

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

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

جدول ۳- زوایای شیب سراسری پیشنهادی برای معدن چادرملو

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

www.SID.ir

کتابنگاری

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

Refrences

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 Mont 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.

Archive of SID

www.SID.ir

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.

Archive of SID

www.SID.ir