

## Penggunaan Kaedah Pengoptimuman Kelompok Zarah dalam Menilai Keboleharapan Analisis Kestabilan Cerun Tanah

(Application of Particle Swarm Optimization in Evaluating the Reliability of Soil Slope Stability Analysis)

MOHD RAIHAN TAHA\*, MOHAMMAD KHAJEHZADEH & AHMED EL-SHAFIE

### ABSTRAK

*Objektif kajian ini adalah untuk menunjukkan pembangunan kaedah berangka untuk menilai keboleharapan cerun tanah dan menentukan kebarangkalian permukaan gelongsoran genting. Fungsi prestasi dirumuskan menggunakan kaedah had keseimbangan Bishop mudah untuk mengira indeks keboleharapan. Indeks keboleharapan yang ditakrifkan oleh Hasofer dan Lind digunakan sebagai indeks ukuran keselamatan. Pencarian permukaan gelongsoran genting secara kebarangkaliannya yang berkaitan dengan indeks keboleharapan terendah dirumuskan sebagai masalah pengoptimuman. Seterusnya pengoptimuman kelompok zarah digunakan untuk mengira indeks keboleharapan Hasofer dan Lind dan kebarangkalian permukaan kegagalan genting. Penggunaan algoritma ini ditunjukkan melalui tiga contoh berangka daripada kajian terdahulu. Keputusan menunjukkan bahawa kaedah yang dicadangkan berupaya untuk memberikan penyelesaian yang lebih baik bagi analisis keboleharapan cerun tanah berbanding dengan kaedah yang dilaporkan dalam kajian-kajian terdahulu.*

*Kata kunci: Keboleharapan cerun; kestabilan cerun; pengoptimuman kelompok zarah*

### ABSTRACT

*The objective of this research was to show the development of a numerical procedure to evaluate the reliability of earth slope and locating the critical probabilistic slip surface. The performance function is formulated using simplified Bishop's limit equilibrium method to calculate the reliability index. The reliability index defined by Hasofer and Lind was used as an index of safety measure. Searching the critical probabilistic surface that was associated with the lowest reliability index was formulated as an optimization problem. In this paper, particle swarm optimization was applied to calculate the minimum Hasofer and Lind reliability index and critical probabilistic failure surface. To demonstrate the applicability and to investigate the effectiveness of the algorithm, three numerical examples from the literature were illustrated. Results showed that the proposed method was capable of achieving better solutions for reliability analysis of slope compared with those reported in the literatures.*

*Keywords: Particle swarm optimization; slope reliability evaluation; slope stability*

### PENGENALAN

Masalah kestabilan cerun memainkan peranan yang sangat penting dalam isu struktur bumi terutamanya seperti yang dikaji dalam bidang kejuruteraan perlombongan dan geoteknik. Penilaian kestabilan cerun yang ketidakstabilannya akan menyebabkan bencana besar pada kawasan atau keadaan sekelilingnya perlu dilakukan menggunakan teknik yang paling sesuai. Kebanyakan kaedah analisis kestabilan cerun adalah berdasarkan kaedah berketentuan dan lapisan tanah dianggap sebagai seragam dan melibatkan penggunaan ciri tanah purata. Dalam kaedah deterministik, faktor keselamatan biasanya digunakan untuk menzahirkan keselamatan sesuatu cerun. Faktor keselamatan tersebut adalah nisbah satu sebutan berkaitan rintangan tanah kepada satu sebutan daya yang menjadi penyebab ketakstabilan cerun.

Secara amnya, faktor keselamatan bukanlah satu ukuran yang konsisten bagi mengukur risiko. Cerun

dengan nilai faktor keselamatan yang sama kemungkinan mempunyai paras risiko yang berlainan bergantung kepada kebolehubahan ciri tanah. Adalah mustahil untuk menilai berapa selamatnya cerun apabila faktor keselamatan ditingkatkan. Ini menunjukkan bahawa satu kaedah berstruktur dan kuantitatif diperlukan bagi menyelesaikan ketakpastian yang wujud dalam masalah tersebut. Pendekatan kebarangkalian menjadi pilihan semula jadi bagi analisis sedemikian kerana ia membenarkan terus penggabungan ketakpastian kedalam model analitik.

Kebelakangan ini, beberapa kaedah analisis cerun secara kebarangkalian telah dikembangkan (Bhattacharya et al. 2003; Cho 2007; Hassan & Wolf 1999; Tobbut & Richards 2005 & Xie et al. 2008). Keputusan analisis kebarangkalian boleh dirumuskan sebagai kebarangkalian kegagalan atau indeks keboleharapan. Hasofer dan Lind (1974) mencadangkan takrifan tak varian bagi indeks keboleharapan. Mereka mentakrifkan indeks keboleharapan  $\beta$  sebagai jarak minimum daripada titik

asalan dalam ruang normal piawai ke permukaan keadaan had. Untuk menggunakan analisis kebarangkalian menggunakan indeks keboleharapan Hasofer-Lind ( $\beta_{HL}$ ), masalah kekangan pengoptimuman perlu diselesaikan untuk mencari indeks keboleharapan minimum kegagalan menggunakan teknik pengoptimuman yang sewajarnya.

Satu subset kaedah pengoptimuman algorithma berevolusi yang baru dikembangkan iaitu kaedah pengoptimuman kelompok zarah (PSO) menunjukkan ia boleh memberikan banyak kebaikan dan juga bersifat teguh. Kaedah ini berasal daripada psikologi sosial, khususnya simulasi kelakuan sosial kumpulan burung. Berdasarkan ilham teori pintar kelompok, Kennedy dan Eberhart (1995) mula-mula membuat rumusan matematik bagi kaedah PSO ini. Algorithm PSO mempunyai beberapa kebaikan berbanding algorithma pengoptimuman yang lain. Ia merupakan algorithma mudah dengan hanya melibatkan beberapa parameter yang perlu diubah semasa proses pengoptimuman. Ini membuatnya bersesuaian dengan sebarang bahasa komputer moden. Ia juga boleh digunakan dalam sebarang aplikasi. Kertas ini mengenengahkan penggunaan PSO bagi meminimumkan indeks keboleharapan Hasofer-Lind ( $\beta_{HL}$ ) dan menentukan permukaan gelongsoran kebarangkalian kritikal dikaji bagi cerun tanah.

ANALISIS KEBARANGKALIAN KESTABILAN CERUN

Masalah analisis kebarangkalian dirumuskan oleh satu vektor  $X=[X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]$ , yang mewakili satu set pembolehubah rawak. Berdasarkan pembolehubah tak menentu tersebut, satu fungsi prestasi  $g(X)$  dirumus untuk menggambarkan hadnya dalam ruang  $X$ . Fungsi prestasi membahagi ruang vector  $X$  kepada dua kawasan yang berlainan. Kawasan yang selamat diberikan sebagai

$g(X) > 0$  dan yang gagal  $g(X) < 0$ , manakala permukaan keadaan had adalah  $g(X) = 0$ . Fungsi prestasi bagi kestabilan cerun adalah satu fungsi faktor keselamatan (factor of safety,  $FS$ ) yang selalu ditakrifkan sebagai:

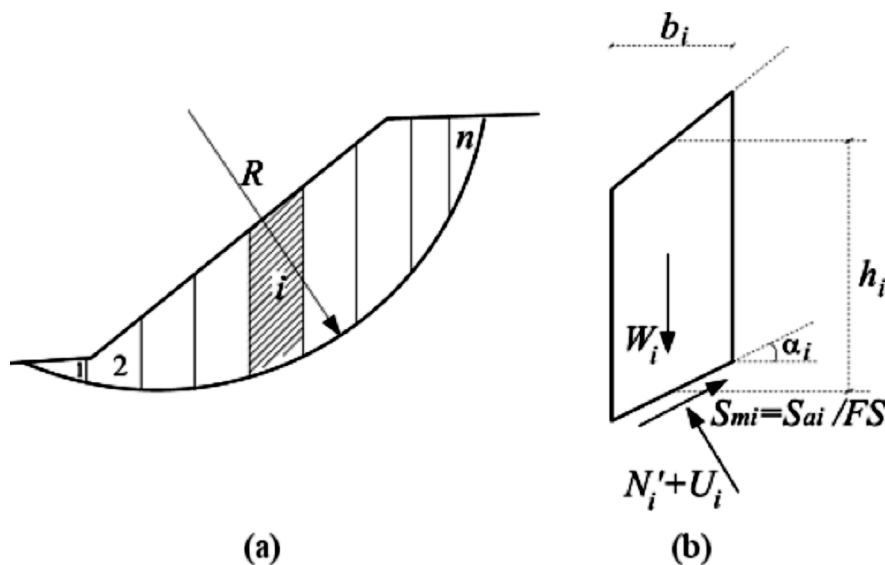
$$g(X) = FS - 1. \tag{1}$$

Menurut (1),  $FS$  adalah faktor keselamatan yang boleh dinilai menggunakan sebarang kaedah had keseimbangan. Kaedah Bishop mudah telah digunakan dalam kertas ini untuk mengira faktor keselamatan berdasarkan kaedah had keseimbangan.

Bishop (1955) hanya mempertimbangkan analisis bagi permukaan gelongsoran berbentuk membulat dan  $FS$  ditentukan secara cuba-cuba kerana sebutan  $FS$  wujud dalam kedua-dua belah persamaan (2). Daya ricih antara hirisan yang dikaji diabaikan dalam kaedah ini dan hanya daya normal pada hirisan tersebut diambil kira. Walau bagaimanapun daya normal kiri dan kanan hirisan ini dianggap sebaris (Budhu 2007), maka ianya lupus kerana melawan satu sama lain. Daya-daya yang bertindak di atas satu hirisan cerun yang dikaji ditunjukkan dalam Rajah 1.

Dalam Rajah 1,  $W_i$  ialah berat jumlah hirisan  $i$ ;  $N_i'$  ialah tegasan normal berkesan bagi hirisan  $i$ ;  $U_i$  = tekanan air liang pada hirisan  $i$ ;  $S_{mi}$  ialah kekuatan ricih tergerak bagi hirisan  $i$ ;  $S_{ai}$  ialah kekuatan ricih sedia ada bagi hirisan  $i$  ( $S_{ai} = c_i' + b_i \sec \alpha_i + N_i' \tan \phi_i'$ );  $FS$  ialah faktor keselamatan;  $b_i$  ialah lebar hirisan  $i$ ;  $c_i'$  ialah jeleket berkesan bagi hirisan  $i$ ;  $\phi_i'$  ialah sudut geseran berkesan bagi hirisan  $i$ ;  $h_i$  ialah purata ketinggian hirisan  $i$ ;  $\alpha_i$  ialah kecondongan dasar hirisan bagi hirisan  $i$ ;  $R$  ialah jejari permukaan gelongsoran; dan  $n$  ialah bilangan hirisan.

Persamaan bagi faktor keselamatan ( $FS$ ) yang diterbitkan daripada kesimbangan momen adalah:



RAJAH 1. Daya-daya yang bertindak ke atas hirisan yang lazim dalam kaedah Bishop mudah.  
 (a) Cerun dengan permukaan gelongsoran berbentuk bulat dan  
 (b) Daya-daya yang bertindak ke atas hirisan  $i$

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i b_i \sec \alpha_i + (m_{\alpha_i} [W_i - \frac{c'_i b_i \tan \alpha_i}{FS} - u_i \cdot b_i] \tan \phi'_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

Semua parameter dalam (2) didefinisikan dalam Rajah 1 dan  $m_{\alpha}$  diberikan sebagai:

$$m_{\alpha_i} = 1 / [\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \phi'_i}{FS}] \quad (3)$$

Kebarangkalian kegagalan cerun boleh diberikan dalam sebutan fungsi prestasi daripada kamiran berikut:

$$P_f = P[g(X < 0)]. \quad (4)$$

Penggunaan teori kebarangkalian yang paling berkesan kepada analisis kestabilan cerun melibatkan ketakpastian diberikan dalam bentuk indeks keboleharapan ( $\beta$ ). Indeks ini memberikan keterangan yang lebih banyak mengenai kestabilan cerun dan memberikan gambaran yang lebih baik mengenainya daripada hanya faktor keselamatan kerana ia mengambilkira nilai ketakpastian fungsi prestasi. Ia juga memberikan ukuran keselamatan yang lebih baik, iaitu cerun dengan  $\beta$  yang lebih tinggi adalah lebih selamat daripada cerun dengan  $\beta$  yang lebih rendah.

Bergantung kepada bentuk fungsi prestasi, wujud beberapa definisi bagi indeks keboleharapan. Hasofer & Lind (1974) mencadangkan takrifan tak varian bagi indeks keboleharapan sebagai jarak minimum daripada asalan dalam ruang normal piawai kepada permukaan keadaan had. Jarak ini juga dinamakan indeks keboleharapan Hasofer-Lind (H-L) dan diberikan tanda  $\beta_{HL}$  (Rajah 2(b)).

Penentuan indeks keboleharapan H-L ( $\beta_{HL}$ ) memerlukan semua pemboleh ubah rawak  $X$  diubah kepada ruang normal piawai  $U$ , melalui penjelmaan orthogonal:

$$u_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad (5)$$

dengan  $\mu_i$  dan  $\sigma_i$  masing-masing mewakili purata dan sisihan piawai bagi  $x_i$ . Sebutan matriks indeks keboleharapan H-L ( $\beta_{HL}$ ) boleh ditulis sebagai berikut (Ditlevsen 1981; Low & Tang 1997):

$$\beta_{HL} = \min_{X \in F} \sqrt{\left[ \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right]^T [R]^{-1} \left[ \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right]} \quad (6)$$

dengan vektor  $X$  mewakili set pemboleh ubah rawak  $x_i$ ,  $F$  adalah domain kegagalan dan  $R$  adalah matriks korelasi yang mengandungi korelasi-korelasi antara set  $n$  pemboleh ubah rawak.

Seperti yang telah disebutkan sebelum ini, indeks keboleharapan H-L ( $\beta_{HL}$ ) ditakrifkan sebagai jarak minimum dari asalan satu paksi dalam ruang normal piawai kepada permukaan keadaan had. Penentuan  $\beta_{HL}$  boleh dilakukan dengan menyelesaikan masalah pengoptimuman yang dikekang seperti berikut:

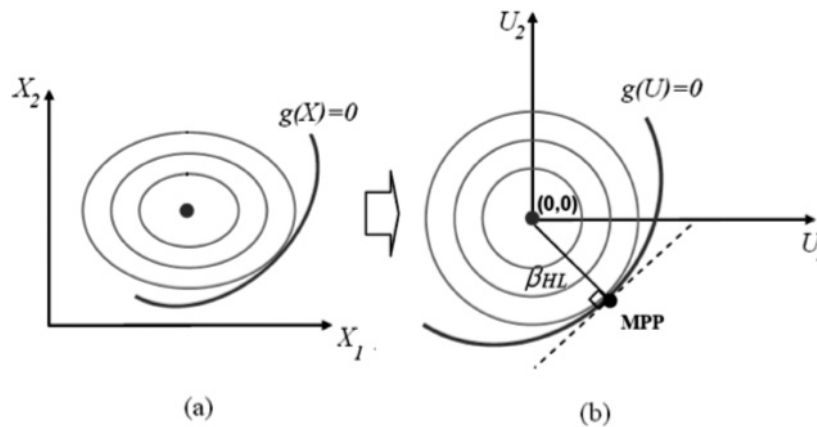
$$\begin{aligned} &\text{Meminimumkan } \beta_{HL} \\ &\text{Dengan syarat } g(U)=0. \end{aligned} \quad (7)$$

Penyelesaian (7) adalah sama dengan penyelesaian bentuk mudah/selesa yang didapati menggunakan kaedah penalti berikut:

$$\text{Meminimumkan } \beta_{HL} + r|g(U)|^l. \quad (8)$$

Parameter  $r$  dan  $l$  adalah bergantung kepada masalah dan  $r$  mestilah pemalar positif yang agak besar. Kajian ini menetapkan nilai  $r$  dan  $l$  masing-masing adalah 1000 dan 2.

Penyelesaian kepada masalah pengoptimuman di atas adalah titik rekaan atau dinamakan MPP (most probable point) dalam ruang pemboleh ubah normal. Beberapa algoritma telah dicadangkan bagi penyelesaian masalah pengoptimuman persamaan (8) dan kaedah PSO telah digunakan dalam kajian ini.



RAJAH 2. Petunjuk geometri bagi definisi indeks keboleharapan  
(a) Ruang pemboleh ubah rawak (Ruang-X) dan (b) Ruang normal piawai (Ruang-U)

PENGOPTIMUMAN KELOMPOK ZARAH (PSO)

Algorithm PSO telah diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart (1995). PSO telah diterbitkan daripada versi mudah simulasi kelompok. Ia mempunyai ciri yang berasaskan kepada kelakuan sosial manusia.

PSO mempunyai sebilangan zarah yang dikenali sebagai kelompok. Zarah ini ditetapkan berada secara rawak dalam ruang berbilang dimensi bagi satu fungsi objektif. Setiap zarah mewakili satu potensi penyelesaian bagi masalah pengoptimuman. Zarah tersebut tersebar dalam ruang yang dicari dan kedudukan terakhirnya adalah berdasarkan kepada kedudukan terbaik zarah individu tersebut serta kedudukan terbaik yang dicari oleh kelompok. Fungsi objektif dinilai bagi setiap zarah semasa lelaran, dan nilai yang sesuai digunakan untuk menentukan kedudukan mana yang lebih baik daripada yang lain-lain.

Pada setiap lelaran, proses mengemaskini melibatkan gerakan zarah dengan menambah perubahan halaju,  $V_i^{k+1}$  kepada kedudukan terkini,  $X_i^k$  seperti yang ditunjukkan oleh:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

Halaju adalah gabungan tiga faktor penyumbang: halaju sebelumnya,  $V_i^k$ , pergerakan dalam arah  $P_i^k$  setempat yang terbaik, dan pergerakan dalam arah  $P_g^k$  global yang terbaik. Rumusan matematik diberikan sebagai (Cho 2007):

$$V_i^{k+1} = w \times V_i^k + c_1 \times r_1 \times (P_i^k - X_i^k) + c_2 \times r_2 \times (P_g^k - X_i^k), \quad (10)$$

dengan  $w$  adalah pembeda inersia untuk mengawal pengaruh halaju sebelumnya;  $r_1$  dan  $r_2$  adalah dua nombor rawak yang tertabur seragam dalam julat (0, 1);  $c_1$  dan  $c_2$  adalah dua pemalar pecutan yang biasanya mempunyai nilai 2;  $P_i^k$  adalah kedudukan terbaik zarah ke  $i$  sehingga lelaran  $k$  dan  $P_g^k$  adalah kedudukan terbaik antara semua zarah dalam kelompok sehingga lelaran  $k$ . Fungsi

pembeda inersia dalam persamaan (10) selalunya dikira menggunakan persamaan berikut:

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \times k/G, \quad (11)$$

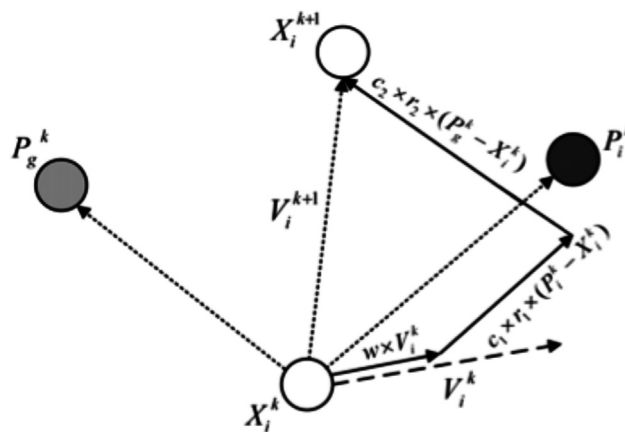
dengan  $w_{max}$  dan  $w_{min}$  adalah nilai maksimum dan minimum bagi  $w$ ,  $G$  adalah bilangan maksimum lelaran dan  $k$  adalah bilangan lelaran semasa. Rajah 3 menunjukkan kedudukan zarah dalam PSO yang dikemas kini.

CONTOH BERANGKA

Bahagian ini menyelidiki kesasihan dan keberkesanan algorithm yang digunakan dalam analisis kebarangkalian kestabilan cerun. Tiga masalah telah dipilih untuk mengesahkan serta menilai penggunaan kaedah ini daripada kajian-kajian terdahulu. Kaedah ini telah dijalankan menggunakan perisian MATLAB versi R2009a. Program ini mencari permukaan gelongsoran genting daripada analisis berketentuan dan kebarangkalian. Berdasarkan ini, pelaksanaan kaedah yang dicadangkan bagi analisis keboleharapan cerun tanah adalah seperti berikut:

1. Menetapkan kedudukan dan halaju satu set zarah yang bertabur secara rawak dalam keseluruhan ruang yang direka disempadani oleh had-had yang tertentu.
2. Menilai fungsi objektif menggunakan persamaan (8) bagi setiap zarah dalam kelompok.
3. Mengemaskini kedudukan zarah optimum pada lelaran terkini dan kedudukan zarah optimum global.
4. Mengemaskini vektor halaju seperti yang ditentukan dalam persamaan (10) dan kemas kini kedudukan setiap zarah mengikut persamaan (9).
5. Ulang langkah 2-4 sehingga kriteria berhenti dicapai (seperti yang akan diterangkan nanti).

Pengiraan nilai minimum  $\beta_{HL}$  menggunakan PSO memerlukan parameter algorithm diambil atau digunakan dengan tepat. Pelarasan atau penyesuaian parameter yang dilakukan dalam kajian ini adalah berdasarkan beberapa eksperimen dengan melihat kesan setiap parameter



RAJAH 3. Mengemaskini kedudukan zarah dalam PSO

terhadap penyelesaian akhir dan penumpuan algorithma. Hasilnya, populasi 40 individu dipilih; nilai  $w_{max}$  dan  $w_{min}$  yang dipilih adalah masing-masing 0.95 dan 0.45; dan nilai pemalar pecutan ( $c_1$  and  $c_2$ ) adalah bersamaan 2. Akhir sekali, bilangan lelaran yang ditetapkan ( $G$ ) adalah 3000. Proses pengoptimuman diberhentikan apabila salah satu kriteria tercapai: (1) bilangan lelaran maksimum dicapai; (2) setelah sebilangan lelaran dilakukan, tiada pembaikan signifikan bagi penyelesaian yang dihasilkan.

*Contoh 1.* Rajah 4 menunjukkan geometri satu cerun tanah yang homogen. Parameter yang dianggap sebagai pembolehubah rawak dalam analisis kebarangkalian adalah: sudut geseran berkesan ( $\phi'$ ), jelekit berkesan ( $c'$ ), berat unit ( $\gamma$ ), dan nisbah tekanan air liang ( $r_u$ ).

Jadual 1 menunjukkan nilai purata dan sisihan piawai bagi setiap pembolehubah rawak. Masalah yang dikaji ini juga telah diselesaikan oleh Li dan Lumb (1987), Hassan dan Wolff (1999) serta Bhattacharya et al. (2003). Keputusan yang diperoleh daripada kaedah yang dicadangkan serta perbandingan dengan kajian-kajian terdahulu yang telah disebutkan diberikan dalam Jadual 2.

JADUAL 1. Ciri statistik parameter tanah bagi Contoh 1

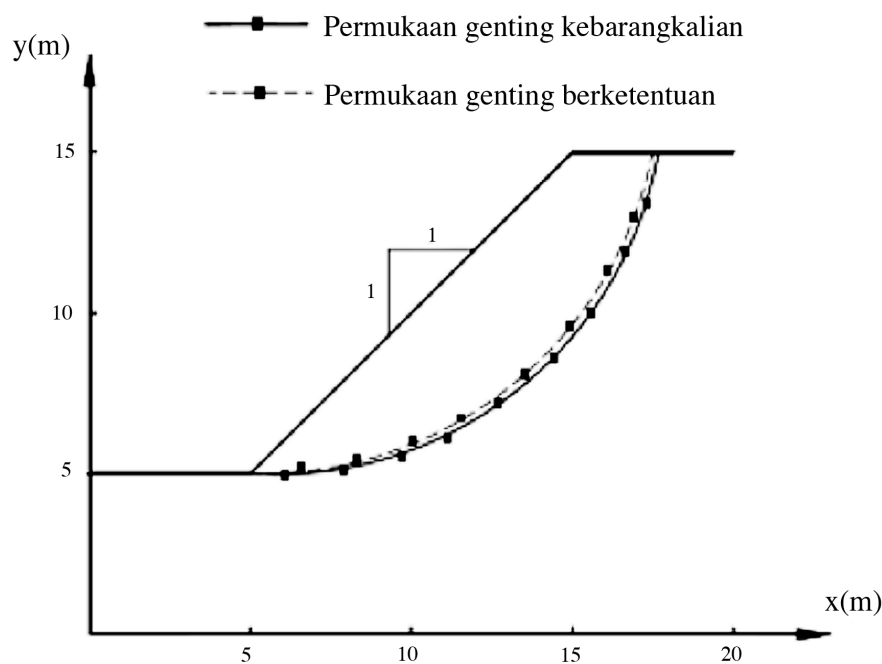
Pembolehubah Rawak	Purata	Sisihan piawai	Taburan
$c'$	18 kN/m <sup>2</sup>	3.6 kN/m <sup>2</sup>	Log-normal
$\tan \phi'$	$\tan 30$	0.0577	Log-normal
$\gamma$	18 kN/m <sup>3</sup>	0.9 kN/m <sup>3</sup>	Log-normal
$r_u$	0.2	0.02	Log-normal

Jadual 2 menunjukkan nilai-nilai  $FS_{min}$  dan  $\beta_{FS}$  yang mana masing-masing adalah faktor keselamatan minimum dan indeks kebolehharapan yang berkaitan dengan permukaan gelongsoran berketentuan genting, dan  $\beta_{min}$  adalah indeks kebolehharapan minimum berkaitan dengan permukaan kegagalan kebarangkalian genting. Ini menunjukkan bahawa indeks kebolehharapan minimum menggunakan PSO adalah 2.216, iaitu lebih rendah daripada yang dilaporkan oleh Li & Lumb ( $\beta_{min} = 2.5$ ), Hassan & Wolff ( $\beta_{min} = 2.293$ ), serta Bhattacharya et al. ( $\beta_{min} = 2.239$ ). Tambahan lagi, faktor keselamatan minimum yang dikira daripada analisis berketentuan berdasarkan nilai purata ciri tanah menggunakan PSO adalah 1.312, iaitu lebih rendah daripada 1.326 yang dilaporkan oleh Bhattacharya et al. (2003).

Permukaan gelongsoran genting daripada kaedah berketentuan dan kebarangkalian juga ditunjukkan dalam Rajah 4. Ternyata kedudukan kedua-dua permukaan ini adalah sama seperti yang dijangkakan. Ini juga adalah disebabkan nilai  $\beta_{FS}$  dan  $\beta_{min}$  yang berhampiran seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2. Kedudukan permukaan kegagalan bagi semua kaedah yang dibandingkan juga adalah hampir sama.

JADUAL 2. Hasil Contoh 1 dan perbandingannya

Kaedah	$\beta_{FS}$	$\beta_{min}$	$FS_{min}$
Li & Lumb (1987)	-	2.5	-
Hassan & Wolff (1999)	2.336	2.293	-
Bhattacharya et al. (2003)	2.306	2.239	1.326
Kaedah ini (PSO)	2.298	2.216	1.312

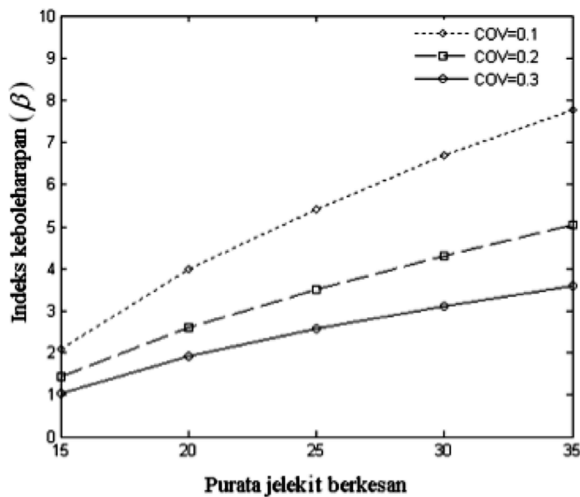


RAJAH 4. Keratan rentas satu cerun yang homogen (Contoh 1)

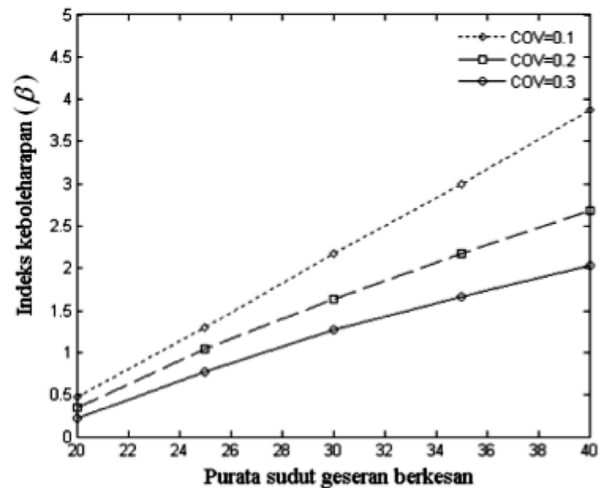
Keboleharapan (ataupun kebarangkalian kegagalan) cerun adalah sensitif kepada perubahan ciri tanah dan nisbah tekanan liang. Kesan parameter ini terhadap keboleharapan cerun dalam contoh ini dikaji dengan mengambil setiap pemboleh ubah dibenarkan berubah secara bebas di sekitar nilai puratanya manakala ciri-ciri lain dikekalkan pada nilai purata mereka. Di samping itu, pekali perubahan (COV) parameter tersebut juga dibenarkan berubah. Pekali perubahan (COV) dinilai daripada nisbah sisihan piawai sesuatu pemboleh ubah rawak kepada nilai purata pemboleh ubah rawak tersebut. Rajah 5 menunjukkan kaitan antara indeks keboleharapan dengan  $\phi'$ ,  $c'$ ,  $\gamma$ , dan  $r_u$  menggunakan analisis kebarangkalian PSO. Rajah 5(a) dan (b) menunjukkan bagaimana indeks keboleharapan berubah dengan ketakpastian nilai kekuatan tanah. Rajah-rajah ini juga menunjukkan bahawa pertambahan dalam nilai purata  $\phi'$  dan  $c'$ , akan menyebabkan pertambahan indeks keboleharapan (atau penurunan nilai  $P_f$ ). Juga dapat dilihat bahawa indeks keboleharapan boleh menurun

beberapa peringkat magnitud apabila COV bagi  $\phi'$ , dan  $c'$ , meningkat. Jadi keboleharapan sangat sensitif terhadap ketakpastian kekuatan tanah. Rajah 5(c) juga menunjukkan apabila purata berat ( $\gamma$ ) meningkat, indeks keboleharapan menurun (atau  $P_f$  meningkat) seperti yang dijangkakan. Rajah ini juga menunjukkan bahawa kesan COV bagi  $\gamma$  terhadap indeks keboleharapan tidaklah signifikan dan keboleharapan adalah bebas atau tak bersandar kepada COV bagi  $\gamma$ . Akhir sekali, kesan ketakpastian  $r_u$  terhadap indeks keboleharapan diberikan dalam Rajah 5(d). Rajah ini menunjukkan kaitan songsang antara  $r_u$  dan indeks keboleharapan.

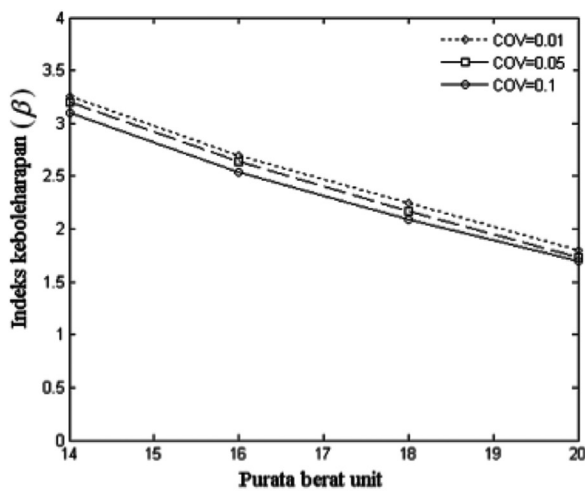
*Contoh 2.* Rajah 6 menunjukkan keratan rentas dan geometri cerun tanah pada lempung dua lapis yang di sempadani oleh lapisan yang keras di sebelah bawah yang selari dengan permukaan tanah. Parameter kekuatan tanah, sudut geseran berkesan ( $\phi'$ ), jelekit berkesan ( $c'$ ) dianggap sebagai pemboleh ubah rawak. Momen statistik



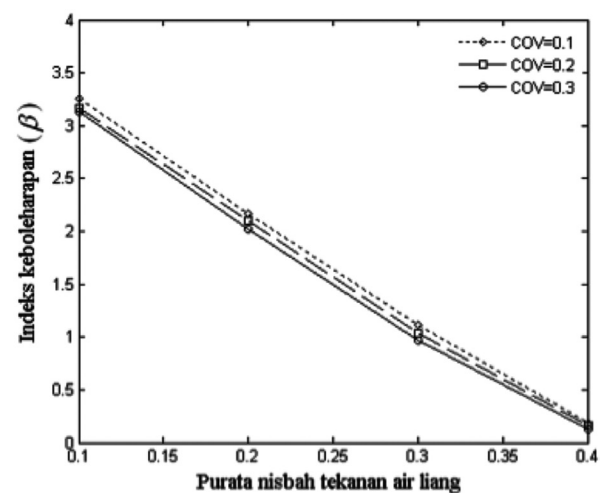
(a)



(b)

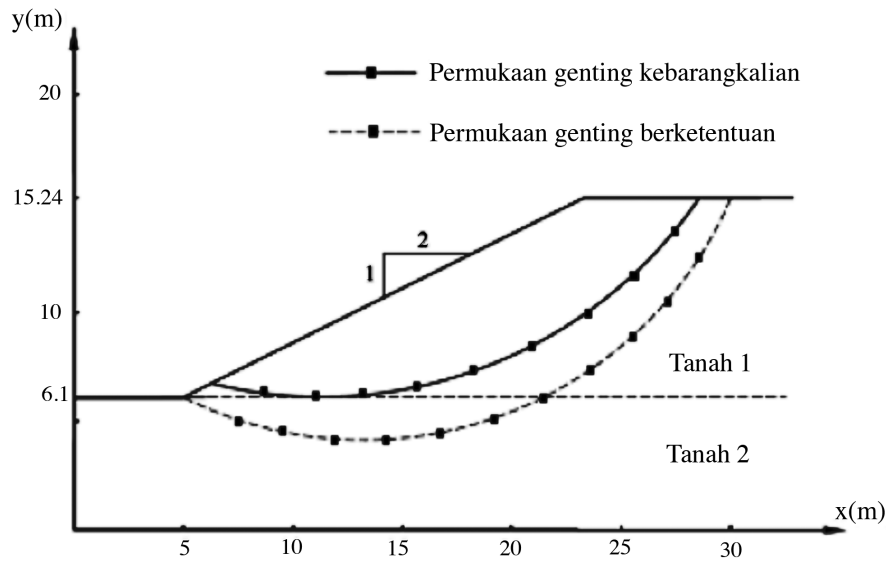


(c)



(d)

RAJAH 5. Perubahan indeks keboleharapan dengan pemboleh ubah rawak: (a) kesan perubahan  $c'$  ke atas  $\beta$ , (b) kesan perubahan  $\phi'$  ke atas  $\beta$ , (c) kesan perubahan  $\gamma$  ke atas  $\beta$  dan (d) kesan perubahan  $r_u$  ke atas  $\beta$



RAJAH 6. Keratan rentas satu cerun tak homogen (Contoh 2)

(purata dan sisihan piawai) parameter ini disenaraikan dalam Jadual 3.

Contoh ini juga telah diselesaikan sebelum ini oleh Hassan dan Wolff (1999) serta Bhattacharya et al. (2003) dengan mendapatkan nilai-nilai  $FS_{min}$ ,  $\beta_{FS}$  dan  $\beta_{min}$ . Keputusan yang diperoleh dalam kajian ini serta perbandingannya dengan kajian terdahulu seperti yang telah disebutkan diberikan dalam Jadual 4. Daripada keputusan yang ditunjukkan dalam jadual ini, nilai yang didapati bagi indeks keboleharapan ( $\beta_{min}$ ) menggunakan kaedah PSO 2.775, iaitu merupakan nilai yang paling rendah berbanding nilai yang dilaporkan oleh Hassan dan Wolff (1999) dan Bhattacharya et al. (2003). Di samping itu, faktor keselamatan minimum ( $FS_{min}$ ) adalah lebih kecil berbanding nilai kaedah lain yang disebutkan. Permukaan gelongsoran kritikal daripada kaedah deterministik dan kebarangkalian ditunjukkan dalam Rajah 6. Oleh sebab terdapat perbezaan dalam nilai-nilai  $\beta_{FS}$  dan  $\beta_{min}$  seperti yang tertera dalam Jadual 4, kedua-dua permukaan ini mempunyai kedudukan yang berlainan.

JADUAL 3. Ciri statistik tanah bagi Contoh 2

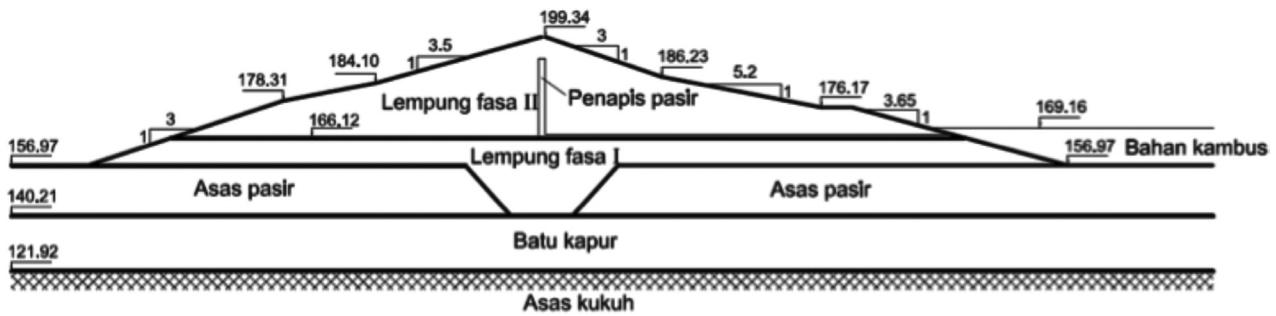
Cerun	Parameter	Purata	Sisihan piawai	Taburan
Tanah 1	$c_1$	38.31 kN/m <sup>2</sup>	7.662 kN/m <sup>2</sup>	Log-normal
	$\phi'_1$	0	-	Log-normal
Tanah 2	$c_2$	23.94 kN/m <sup>2</sup>	4.788 kN/m <sup>2</sup>	Log-normal
	$\phi'_2$	12	1.2	Log-normal

JADUAL 4. Perbandingan keputusan Contoh 2

Kaedah	$\beta_{FS}$	$\beta_{min}$	$FS_{min}$
Hassan & Wolff (1999)	4.442	2.869	1.663
Bhattacharya et al. (2003)	5.064	2.861	1.665
Kajian ini (PSO)	4.551	2.775	1.658

*Contoh 3.* Dalam contoh ini, analisis kebarangkalian bagi empangan Cannon di Missouri, Amerika Syarikat seperti yang dilaporkan oleh Hassan dan Wolff (1999) dikaji. Rajah 7 menunjukkan keratan rentas bagi empangan tersebut. Struktur empangan terdiri daripada dua zon lempung yang dipadat: Kambus lempung fasa I dan fasa II diatas lapisan pasir dan batu kapur. Parameter kekuatan dua lapisan lempung ini dianggap sebagai pembolehubah rawak dan pembolehubah rawak ini dianggap bertabur secara log-normal. Jadual 5 menunjukkan nilai purata dan sisihan piawai bagi parameter ini sebagaimana yang dilaporkan oleh Hassan dan Wolff (1999).

Contoh ini juga telah diselesaikan sebelum ini oleh Hassan dan Wolff (1999) and Bhattacharya et al. (2003) dengan mendapatkan  $FS_{min}$ ,  $\beta_{FS}$  dan  $\beta_{min}$ . Keputusan yang didapati daripada analisis PSO seperti yang dibincangkan dalam kertas ini dan perbandingan dengan keputusan daripada pengkaji sebelum ini disenaraikan dalam Jadual 6. Daripada keputusan yang ditunjukkan, indeks keboleharapan minimum menggunakan PSO adalah 2.661, dan ianya lebih rendah daripada nilai yang dilaporkan oleh Hassan dan Wolff (1999) serta Bhattacharya et al. (2003). Disamping itu juga, faktor keselamatan minimum yang didapati daripada PSO juga adalah lebih rendah daripada yang lain.



Rajah 7. Keratan rentas empangan Cannon - Contoh 3

JADUAL 5. Ciri statistik parameter tanah bagi Contoh 3

Bahan	Parameter	Purata	Sisihan piawai
Lempung fasa I	$c_1$ kN/m <sup>2</sup>	117.79	58.89
	$\phi'_1$	8.5°	8.5°
Lempung fasa I	$c_2$ kN/m <sup>2</sup>	143.64	79
	$\phi'_2$	15°	9°

JADUAL 6. Perbandingan keputusan bagi Contoh 3

Kaedah	$\beta_{FS}$	$\beta_{min}$	$FS_{min}$
Hassan & Wolff (1999)	7.028	2.664	2.647
Bhattacharya et al. (2003)	3.695	2.674	2.612
Kajian ini (PSO)	3.231	2.661	2.598

### KESIMPULAN

Satu prosedur analisis kebarangkalian yang dinamakan pengoptimuman kelompok zarah (PSO) telah dikaji dan dinilai daripada segi aplikasinya bagi menyelidiki kestabilan cerun tanah. Indeks keboleharapan Hasofer-Lind ( $\beta_{HL}$ ) digunakan menggantikan indeks keboleharapan biasa konvensional  $\beta$ . Masalah mencari permukaan kebarangkalian kritikal dengan indeks keboleharapan minimum,  $\beta_{min}$ , boleh dirumuskan sebagai masalah pengoptimuman dan satu kaedah pengoptimuman kelompok zarah ubahsuai dicadangkan sebagai penyelesaian. Perbandingan keputusan menunjukkan bahawa kaedah yang dibentangkan disini menghasilkan indeks keboleharapan minimum yang lebih rendah berbanding kaedah yang dilaporkan dalam literatur bagi kedua-dua contoh yang dikaji, iaitu bagi cerun yang homogen dan tak homogen. Kedudukan permukaan gelongsoran genting menggunakan kaedah kebarangkalian dan berketentuan adalah sama bagi cerun homogen dan ianya berbeza bagi cerun tak homogen. Analisis kepekaan menunjukkan jelekit dan sudut geseran berkesan telah didapati sebagai parameter input yang paling signifikan bagi analisis kebarangkalian cerun manakala berat unit merupakan parameter input yang paling kurang signifikan. Kebarangkalian kegagalan tidak

berubah banyak dengan pekali perubahan (COV) bagi  $\gamma$ . Walau bagaimanapun, ia sangat peka dengan COV  $c'$  and  $\phi'$ . Oleh itu, penentuan berat unit yang tepat bagi analisis kebarangkalian adalah tidak sepenting menentukan jelekit dan sudut geseran berkesan.

### RUJUKAN

- Bhattacharya, G., Jana, D., Ojha, S. & Chakraborty, S. 2003. Direct search for minimum reliability index of earth slopes. *Comput. Geotech.* 30(6): 455-462.
- Bishop, A.W. 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique* 5(1): 7-17.
- Budhu, M. 2007. *Soil Mechanics and Foundation*. 2<sup>nd</sup> Ed. NY: John Wiley & Sons.
- Cho, S. 2007. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability. *Eng. Geol.* 92(3-4): 97-109.
- Ditlevsen, O. 1981. *Uncertainty Modeling with Applications to Multidimensional Civil Engineering Systems*. New York: McGraw-Hill.
- Hasofer, A. & Lind, N. 1974. Exact and invariant second-moment code format. *J. Eng. Mech-ASCE*. 100(1): 111-121.
- Hassan, A. & Wolff, T. 1999. Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes. *J. Geotech. Geoenviron.* 125: 301-308.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. 1995. Particle swarm optimization. *In Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*: pp. 1942-1948.
- Li, K., & Lumb, P. 1987. Probabilistic design of slopes. *Can. Geotech. J.* 24(4): 520-535.
- Low, B. & Tang, W. 1997. Reliability analysis of reinforced embankments on soft ground. *Can. Geotech. J.* 34(5): 672-685.
- Tobutt, D. & Richards, E. 2005. The reliability of earth slopes. *Int. J. Numer. Anal. Met.* 3(4): 323-354.
- Xie, G., Zhang, J., & Li, J. 2008. Adapted Genetic Algorithm Applied to Slope Reliability Analysis, *Fourth International Conference on Natural Computation* pp. 520-524.

Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600, Bangi, Selangor, Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: drmr@eng.ukm.my

Diserahkan: 25 April 2011

Diterima: 13 Februari 2012