

OPTIMALNI POLOŽAJ OTKOPNE FRONTE U ODNOSU NA STRUKTURNI SKLOP (GRAFIČKA METODA PRIMJENOM RAČUNALA)

Ivan TOMAŠIĆ i Vlatko JAKIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, YU – 41000 Zagreb

Ključne riječi: Grafička metoda, Optimalni položaj otkopne fronte, Strukturni sklop, Diskontinuiteti, Stabilnost

Diskontinuiranost stijenske mase kao jedno od osnovnih obilježja strukturnog sklopa obrađena je matematičkom i grafičkom metodom analize pomoću računala. Razvijen je matematički model za određivanje optimalnog položaja otkopne fronte u odnosu na strukturni sklop i stabilnost stijenske mase.

Metoda osigurava dobivanje osnovnih elementa važnih za projektiranje položaja i nagiba kosina otkopnih fronti kod čvrstih raspucalih stijena. Model je testiran na većem broju terenskih podataka pokazavši pritom zadovoljavajuće rezultate.

Key-words: Graphical method, Optimum position of excavation fronts, Structure fabric, Discontinuities, Stability

The rock mass discontinuity, being one of the basic structure fabric characteristics, has been elaborated with mathematical and graphical method of analysing by means of computer. Mathematical and algorithmal model has been made for determination of optimum position of excavation front in relation to rock mass stability and structure fabric.

The method gives the basic elements which are important for rock slope design, especially for deep and direction of excavation slopes in a hard fractured rocks. The model has been tested on a large number of field data and it has proved to be satisfactory.

Uvod

Diskontinuiranost stijenske mase kao jedno od važnih obilježja strukturnog sklopa predmet je izučavanja velikog broja istraživača, posebice za potrebe projektiranja položaja i nagiba kosina otkopnih fronti kod čvrstih i raspucalih stijena.

Razvijen je matematički model, te prilagođen za obradu na računalu u cilju određivanja optimalnog položaja otkopne fronte u odnosu na strukturni sklop i stabilnost stijenske mase.

Algoritam se temelji na grafičkoj metodi analize najpovoljnijeg položaja otkopne fronte prema Hoek-u i Bray-u (1974).

Različite tipove nestabilnosti moguće je najbolje uočiti na otvorenim površinskim kopovima. Patton i Deer (1971) dijele tipove nestabilnosti u tri kategorije:

- I. – lokalni slom samo preko jedne etaže,
- II. – široki klinasti slom preko više etaža,
- III. – slom uslijed smicanja i premještanja stijenske mase preko nekoliko etaža.

Razne tipove klinova koji mogu, odnosno ne mogu, klizati duž kosine nakon što je prekoračena granična čvrstoća stabilnosti navodi Pentz (1971). Klinovi koji se formiraju na rubovima etaža najčešće imaju oblik tetraedra. Prema Hocking-u (1976) mogu se razlikovati jednostruko i dvostruko klizanje klinova u obliku tetraedra.

Rezultati istraživanja pokazuju da se pravi položaj otkopne fronte može dobiti samo analizom strukturnog sklopa pomoću odgovarajuće grafičke metode (Tomašić, 1986).

U praksi postoje tri tipa otvaranja kamenoloma i građevinskih zasjeka s obzirom na nagib i pružanje slojeva u odnosu na smjer napredovanja eksploatacije odnosno otkopa:

- I. – slojevi su nagnuti prema radilištu (otkopna fronta paralelna je s pružanjem slojeva),
- II. – slojevi su nagnuti u stijenski masiv (otkopna fronta paralelna je s pružanjem slojeva),
- III. – otkopna fronta približno je okomita na pružanje slojeva.

Dosadašnja iskustva stečena analiziranjem različitih primjera (Tomašić, 1989), ukazuju da je najpovoljniji treći tip otvaranja i eksploatacije kamenoloma, tj. orijentacija otkopnih fronti približno okomito na pružanje naslaga. To ne znači da je dovoljno samo zaokrenuti otkopnu frontu iz položaja nestabilnosti u bilo koji položaj okomit na pružanje (postoje dva), već je, a to pokazuju analize, samo jedna od dviju mogućnosti ona prava.

Razvijen i obrađen matematički model temelji se na ulaznim podacima, izmjerenim diskontinuitetima, kutu unutrašnjeg trenja φ i nagibu otkopne fronte koji se obično uzima da iznosi 70° .

Budući da razrađeni model počiva na velikom broju numeričkih podataka, obrada je realizirana na računalu. Pri sastavljanju programa (Jakić, 1989) postavljen je zahtjev za njegovom modularnošću, kako bi se model tokom vremena mogao nadopunjavati s novim i postojećim geološkim programskim paketima, te što jednostavnije proširivati. Cijeli program izveden je pod imenom »SLOPE«.

Matematički model

Prikazivanje diskontinuiteta

Diskontinuitet je određen nagibom i usmjerenjem. Matematički i u grafičkom prikazu diskontinuitet je prikazan elipsom s malom poluosi $90-b$, koja je centralno zarotirana za neki kut. Ako promatramo rotiranu elipsu u koordinatnom sustavu koji je za nju vezan (slika 1.), vezu koordinata iste točke u tim sustavima daju formule transformacije:

$$x' = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (1)$$

$$y' = -x \sin \varphi + y \cos \varphi \quad (2)$$

Presjecište diskontinuiteta odgovara jednom od četiri presjecišta dviju elipsi:

$$b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2 \quad (3)$$

$$c^2x_1^2 + a^2y_1^2 = a^2c^2 \quad (4)$$

Presjecišta se izračunaju tako da (1) i (2) supstituiramo u (4), te dobivamo:

$$c^2 (x \cos \varphi + y \sin \varphi)^2 + a^2 (-x \sin \varphi + y \cos \varphi)^2 = a^2c^2$$

$$c^2 (x^2 \cos^2 \varphi + y^2 \sin^2 \varphi + 2xy \sin \varphi \cos \varphi) + a^2 (x^2 \sin^2 \varphi + y^2 \cos^2 \varphi - 2xy \sin \varphi \cos \varphi) = a^2c^2$$

$$x^2 (c^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi) + y^2 (c^2 \sin^2 \varphi + a^2 \cos^2 \varphi) + 2xy (c^2 \sin^2 \varphi - a^2 \sin \varphi \cos \varphi) = a^2c^2$$

Veličine u zagradama jesu konstante:

$$B = c^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi$$

$$A = c^2 \sin^2 \varphi + a^2 \cos^2 \varphi$$

$$C = 2 \sin \varphi \cos \varphi (c^2 - a^2)$$

Jednadžba (4) je transformirana u:

$$Bx^2 + Ay^2 + Cxy = a^2c^2 \quad | * b^2 \quad (5)$$

$$b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2 \quad | * B +$$

$$0 + a^2By^2 - b^2Ay^2 - b^2Cxy = Ba^2b^2 - a^2b^2c^2$$

$$(a^2B - b^2A) y^2 - b^2Cxy = (B - c^2) a^2b^2$$

$$b^2Cxy = (a^2B - b^2A) y^2 - (B - c^2) a^2b^2$$

$$x = ((a^2B - b^2A)/b^2Cy) y^2 - (B - c^2) a^2b^2/b^2Cy$$

$$x = ((a^2B - b^2A)/b^2C)y + ((c^2 - b)a^2/C)1/y$$

Dobivamo nove konstante:

$$D = ((a^2B)/(b^2C)) - A/C$$

$$E = (c^2 - B) a^2/C$$

Varijabla se x sada može izraziti:

$$x = Dy + E/y \quad (6)$$

Uvrštavanjem (6) u jednadžbu (3) dobivamo:

$$b^2 (Dy + E/y)^2 + a^2y^2 = a^2b^2$$

$$b^2 (D^2y^2 + E^2/y^2 + 2DE) + a^2y^2 = a^2b^2 * y$$

$$b^2 (D^2y^4 + E^2 + 2DEy^2) + a^2y^4 = a^2b^2y^2$$

$$y^4 (b^2D^2 + a^2) + y^2 (2DEb^2 - a^2b^2) + b^2E^2 = 0$$

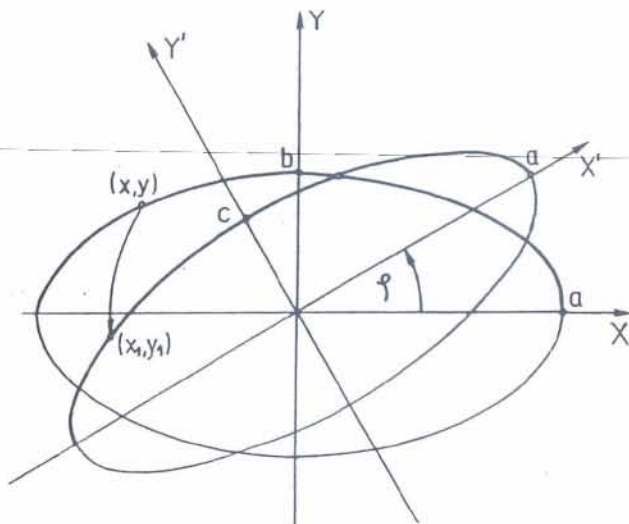
$$F = b^2D^2 + a^2 \quad G = 2DEb^2 - a^2b^2$$

F i G jesu konstante, a supstitucijom varijable $y^2 = z$ dobivamo:

$$z_{1,2} = (-G \pm \sqrt{G^2 - 4b^2FE^2}) / 2F$$

Nova konstanta je $H = -4b^2FE^2$, te slijedi:

$$y_i = \pm \sqrt{z_{1,2}} \quad x_i = Dy_i + E/y_i \quad i=1,2,3,4$$



Sl. 1. Presjecište elipsi
Fig. 1. Intersection of ellipses

Ako je kut između koordinatnih sustava dviju elipsi 90° , slijedi $\cos \varphi = 0$, $\sin \varphi = 1$, proračun presjecišta se znatno pojednostavljuje jer iz jednadžbe (1) slijedi da je: $x_1 = y$, a jednadžba (2) se transformira u: $y_1 = -x$.

Računalo u petlji izračuna kut φ i odredi kojim će se načinom izračunati presjecišta. Ako je kut φ 0 ili 180° , između tih elipsi nema presjecišta i računalo prelazi na slijedeći par varijabli x i y .

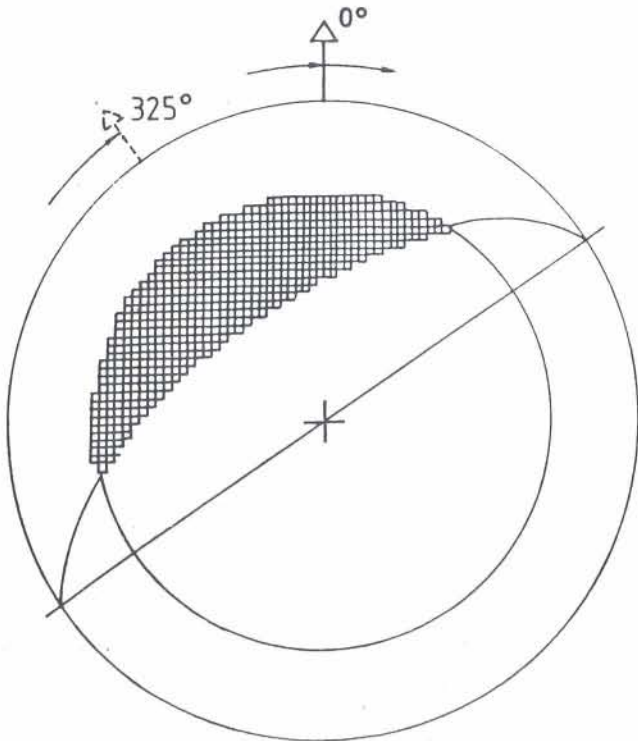
Brojanje točaka u kritičnoj zoni

Presjecišta grafičkih prikaza diskontinuiteta daju $n(n-1)$ točaka, svaku s položajnim koordinatama (x_n, y_n) . Kritična zona omeđena je krugom trenja i elipsom koja predstavlja projektni nagib otkopne fronte.

Zadatak modula OPTIMUM jest da tu kritičnu zonu oblikom kao polumjesec (slika 2.), rotira puni krug 0° do 360° i da na svakom od 360 premjera prebroji sve točke koje u nju padaju. Zadatak se obavlja u dva dijela. Prvi se sastoji od prikaza kritične zone, tj. od digitalnog opisivanja površine polumjeseca na memorijskoj mapi, a drugi korak od prebrojavanja »osvjetljenih« točaka na toj površini.

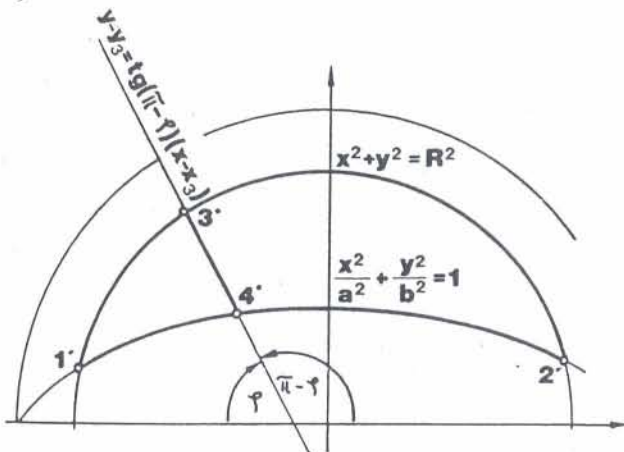
Prikaz kritične zone

Računalo može sliku pamti i koristiti u obliku vodoravnog i okomitog niza diskretnih točaka. Tako se polumjesec kritične zone može prikazati kao niz



Sl. 2. Prikaz kritične zone
Fig. 2. Display of critical zone

stepenasto naslaganih pravaca na memorijskoj mapi čiji položaj je određen koordinatama početne točke i brojem točaka koje slijede iza nje, tj. nizom koji se sastoji od različitog broja članova oblika $t(x, y, d)$.



Sl. 3. Definiranje površine kritične zone
Fig. 3. Definition of critical zone surface

Prema slici 3., presjecište pravca, koji kružnicu siječe u točki 3° pod kutom $-\varphi$, s elipsom u točki 4°, jest rješenje sustava jednadžbi:

$$b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2 \quad (3)$$

$$y = \text{tg } \varphi (x - x_3) + y_3 \quad (7)$$

Supstitucijom (7) u (3) dobije se:

$$b^2x^2 + a^2(\text{tg } \varphi (x - x_3) + y_3)^2 = a^2b^2$$

$$b^2x^2 + a^2(\text{tg}^2 \varphi (x^2 - 2xx_3 + x_3^2) + 2y_3(x - x_3) \text{tg } \varphi + y_3^2) = a^2b^2 \quad | * 1/a^2$$

Slijedi normalna kvadratna jednadžba:

$$(b^2/a^2 + \text{tg}^2 \varphi)x_4^2 + (2y_3 \text{tg } \varphi - 2x_3 \text{tg}^2 \varphi)x_4 + (x_3^2 \text{tg}^2 \varphi - 2y_3x_3 \text{tg } \varphi + y_3^2 - b^2) = 0$$

Izrazi u zagradama jesu konstante i redom ih označavamo sa A, B i C, te su rješenja kvadratne jednadžbe:

$$x_4 = -B + \sqrt{B^2 - 4AC} / 2A;$$

$$y_4 = \text{tg } \varphi (x_4 - x_3) + y_3$$

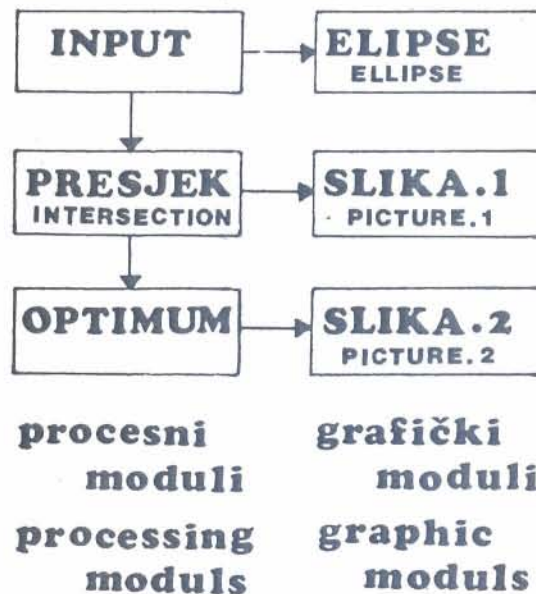
$$d = \text{SQR}((x_4 - x_3) * (x_4 - x_3) + (y_4 - y_3) * (y_4 - y_3))$$

Točke 1' i 2' jesu presjecišta kruga gdje je $d=0$.

Opisivanje 360 usmjerenja polumjeseca zahtjeva mnogo računanja s veličinama danim u pokretnom zarezu, a time i mnogo procesorskog vremena. Taj posao može se skratiti ako se slika polumjeseca rotira oko osi koordinatnog sustava, što je elementarna, znači brza strojna operacija jer se radi samo o zamjeni koordinata, a pokriva odjednom 8 usmjerenja.

Izvedba programa

Programski paket SLOPE razvijen je kao programska podrška grafičkoj metodi rješavanja problema položaja kosine otkopne fronte u odnosu na strukturni sklop i stabilnost stijenske mase. Program je izgrađen na modularnom principu, koji se u novije vrijeme nametnuo kao standard za organizaciju aplikativnog kao i drugih softwera, a sačinjava ga 6 modula. Shema njihovih veza i povezanosti u hijerarhijsku strukturu prikazana je na slici 4.



Sl. 4. Shematski prikaz povezanosti modula
Fig. 4. Schematic display of module connection

Moduli programa SLOPE nadograđeni su svaki oko svojeg specifičnog matematičkog problema koji rješavaju. Moduli su istovremeno i zavisni i nezavisni u svom radu. Izlazni rezultati jednog modula ujedno jesu ulazni podaci za slijedeće module. U svakom koraku rezultati se pohranjuju na vanjski

memorijski medij, tako da je rad moguće prekinuti, pa kasnije nastaviti.

Ovakvo rastavljanje cjelovitog programskog zadatka ima svoje opravdanje u tome što bitno olakšava ispravljanje, podešavanje, a pogotovo eventualno nadograđivanje i usavršavanje programskih rješenja.

Potprogram CALC u svim modulima sadržava programsku izvedbu matematičkog algoritma oko kojeg je modul izgrađen i koji predstavlja njegov glavni posao.

Ulazni podaci

Ulazni podaci programa SLOPE jesu:

- I - šifra ležišta,
- II - broj diskontinuiteta,
- III - kut unutrašnjeg trenja,
- IV - nagib otkopne fronte,
- V - diskontinuitet (azimut, nagib i kategorija).

Modul INPUT

Ulazne podatke prihvaća modul INPUT, kojem je zadatak da formira program u vidu glavne datoteke i tablice podataka o izmjerenim i klasificiranim diskontinuitetima koji se uzimaju u obzir.

Kako je grafički prikaz prostornog položaja diskontinuiteta u modulu INPUT samo informativnog karaktera, tako potprogram DRAW ne iscrtava elipse već kružne lukove.

Modul PRESJEK

U modulu PRESJEK praktično je implementiran matematički algoritam kojim se izračunavaju presjecišta elipsi. Pod kontrolom algoritma bira jedno od četiri presjecišta između dvije elipse. Izračunato presjecište upisuje se i pamti u grafičkom polju u memoriji u rezoluciji 181 x 181 točka.

Modul vrši i kontrolni ispis kodiranog oblika slike u kojem su y-koordinate odbrojane od 0 do 180, a zapis xxx-x predstavlja x-koordinatu-težinu presjecišta.

Modul OPTIMUM

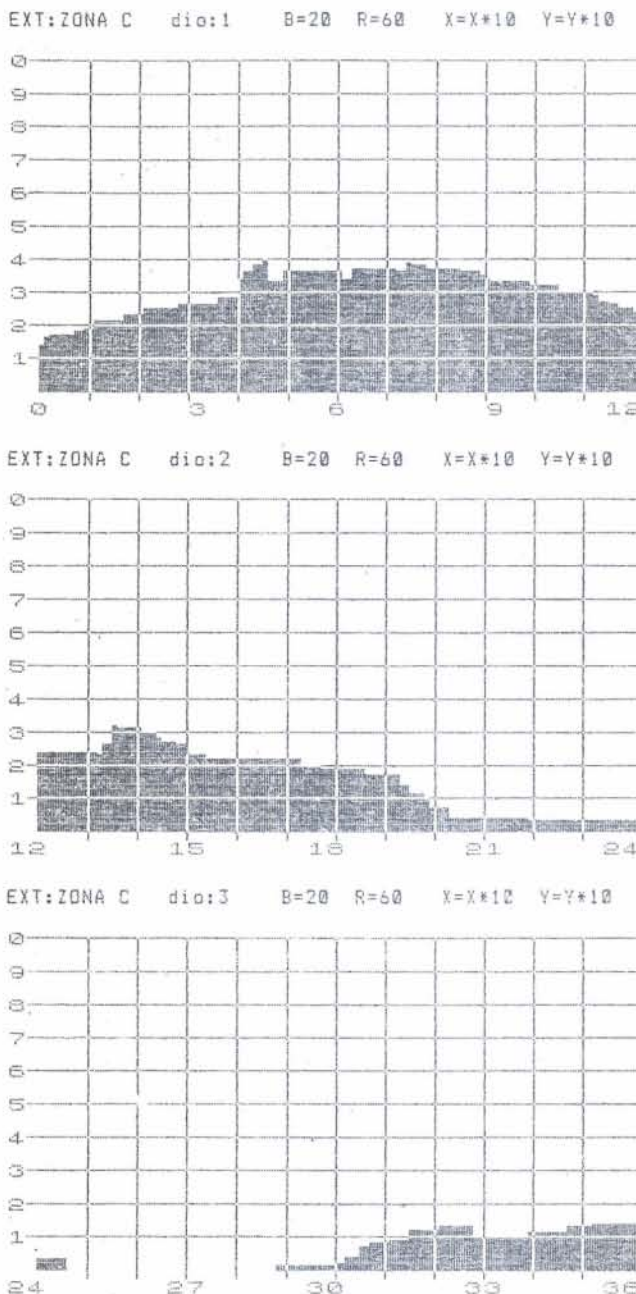
U modulu OPTIMUM implementiran je algoritam i postupak traženja optimalnog usmjerenja nove otkopne fronte. Glavna petlja upravlja usmjerenjem kritičnog polumjeseca, a odabrano je da ovaj ide od 45 do 90°.

Na algoritam CALC vezani su potprogrami ROT i RO+SUM zajedno sa svojim strojnim rutinama koje izvede rotacije te zbrajanja. Vezani na izlazni grafički program GRAPH su potprogrami DRAW i MREZA. Program NUMERIC vrši tabelarni ispis rezultata. Modulom je predviđeno prikazivanje rezultata dijagramom i tablicom.

Na kraju rada modul traži od korisnika da na osnovi grafički (slika 5.) i numerički prikazanih rezultata odredi i upiše optimalna usmjerenja otkopne fronte.

Grafički moduli

Kako su grafički izlazi modula INPUT i PRESJEK samo informativnog karaktera razvijeni su



Sl. 5. Grafički prikaz rezultata modula OPTIMUM
Fig. 5. Graphical presentation of the results obtained by the OPTIMUM module

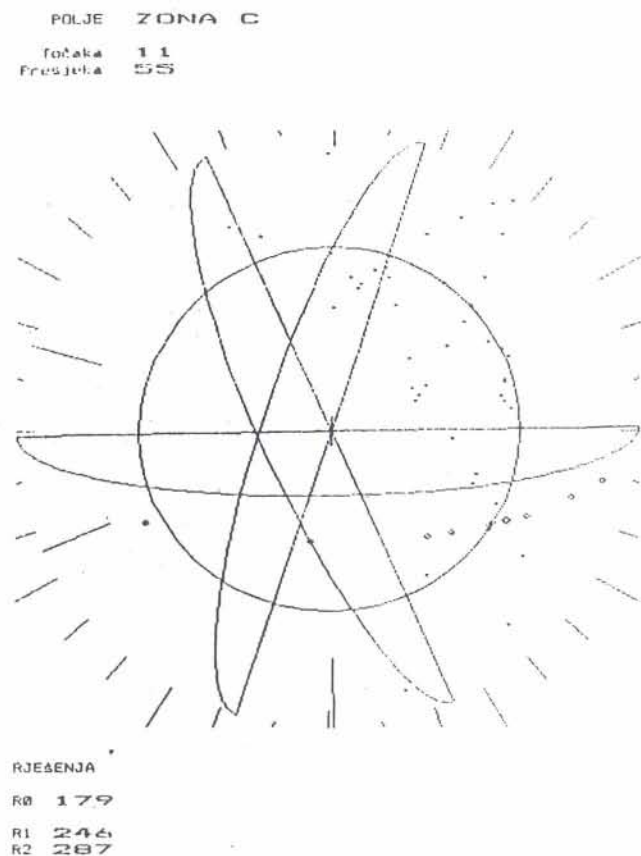
posebni grafički moduli sa zadatkom da spomenute slike nacrtaju u višoj rezoluciji (360 x 360 točaka). Modul ELIPSE grafičko je proširenje modula INPUT, a moduli SLIKA. 1/2 modula PRESJEK i dijelom OPTIMUM.

U modulima SLIKA. 1/2 izostavljen je prikaz cijele elipse kojom se predstavlja diskontinuitet i to zbog preglednosti i relevantnosti za problem. Od svih točaka elipse za problem su značajne samo one koje predstavljaju presjecišta s drugim elipsama. Tako smo odlučili da sliku o temeljima situacije odvojimo u poseban modul ELIPSE.

Modul SLIKA. 1 proizvodi sliku u visokoj rezoluciji presječnih točaka koje je izračunao modul PRESJEK. Težine presjecišta prikazuju se u tri vizualne kategorije. Na tu sliku preklapa modul SLI-

KA.2 prikaze fronti čija su usmjerenja specificirana u modulu OPTIMUM na osnovu uvida u rezultate rada procesnog dijela programa.

Zajednička slika ujedinjuje sve elemente geološke situacije na konkretnom ležištu (slika 6.) i u tom je smislu ključna.



Sl. 6. Grafički prikaz izlaza modula SLIKA. 1/2
Fig. 6. Graphical presentation of the output of the SLIKA. 1/2 module

Testiranje programa

Testiranje programskog paketa SLOPE izvršeno je na primjeru ležišta-kamenoloma tehničkog kamena dolomita »Dolje« kraj Zagreba. Analizirani primjer odnosi se na krajnji zapadni dio stijenske mase (zona C) u ležištu koja je zahvaćena eksploatacijom duž otkopne fronte pružanja istok-zapad. Klizanja i obrušavanja u ležištu učestala su zbog nepovoljnog nagiba slojeva prema radilištu (od 54° do 67°) i njihovih presječnica s pukotinama s kojima formiraju razne oblike nestabilnih klinova. Ovaj primjer već je prethodno obrađen i analiziran klasičnim postupkom pomoću grafičke metode i publiciran (Tomašić, 1989), zbog čega je posebno pogodan radi usporedbe u kvalitativnom i kvantitativnom pogledu. Brzina rješavanja problema i otklanjanje subjektivnog faktora u ocjeni optimalnosti svakako su prednosti vrijedne uloženog truda.

S obzirom da se program odlikuje svojom modularnošću, u pojedinim fazama analize i obrade podataka, mogu se prikazati razne vrste kontrolnih, numeričkih i grafičkih ispisa i crteža, te konačno rješenje problema.

Tako se na primjer može prikazati kontrolni grafički ispis pomoću modula INPUT i ispis ulaznih podataka o diskontinuitetima i njihove pripadajuće težine s obzirom na učestalost.

Slijedi mogućnost kontrolnog grafičkog ispisa pomoću modula PRESJEK. Numerički prikaz rezultata dobivenih obradom modula OPTIMUM također se može prikazati. Nakon toga slijedi grafički prikaz dobiven pomoću modula OPTIMUM u obliku histograma (slika 5.). Ovaj je ispis sačinjen u tri dijela. Na apscisi su vrijednosti azimuta od 0° do 360° (3 x 120), a na ordinati učestalost frekvencija nepovoljnih presjecišta u kritičnoj zoni između nagiba otkopne fronte i kruga trenja. Ova je učestalost najmanja na području od 246 do 287°, a još uvijek mala u širem području od 198 do 314°. Iz predhodnog slijedi da je optimalni položaj otkopne fronte 261°/70°.

Zaključak

Razrađen je i prikazan matematički model, te programski paket SLOPE kao programska podrška grafičkoj metodi rješavanja problema položaja otkopne fronte u odnosu na strukturni sklop i stabilnost stijenske mase. Problem se sastoji od definiranja matematičkog modela fenomena diskontinuiteta, prikaza elemenata kritične zone tj. prostora između otkopne fronte i kuta unutrašnjeg trenja (φ), te brojenja točaka u kritičnoj zoni.

Program je izgrađen na modularnom principu, koji se u novije vrijeme nametnuo kao standard za organizaciju aplikacijskog kao i drugih softwera.

Diskontinuiteti u stijenskoj masi, odnosno planarni elementi prikazani su u ovom radu sustavom jednadžbi elipsa. Njihova se presjecišta posebno broje u kritičnoj zoni, kategoriziraju i optimaliziraju, te prikazuju numerički i grafički kao rezultati analize.

Postojeća metoda time je kvalitativno i kvantitativno poboljšana zbog čega su povećane njene aplikacijske mogućnosti kod istraživanja, razrade i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, ali i u svim drugim vrstama rudarsko-gradevinskih zahvata u čvrstim stijenama.

Primljeno: 30. I. 1990.

Prihvaćeno: 4. VI. 1990.

LITERATURA

Objavljeno:

- Hocking, G. (1976): A Method for Distinguishing between Single and Double Plane Sliding of Tetrahedral Wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13. 225–226. Pergamon Press, Oxford.
- Hoek, E. and Bray, J. (1974): *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, 402, London.
- Patton, F.D. and Deer, D.U. (1971): Geologic Factors Controlling Slope Stability in Open Pit Mines, *Stability in Open Pit Mining*, 23–47, New York (Proceeding of the First International Conference on Stability in Open Pit Mining – Vancouver, 1970).
- Pentz, D.L. (1971): Method of Analysis of Stability of Rock Slopes, *Stability in Open Pit Mining*, 110–141, New York (Proceedings of the International Conference on Stability in Open Pit Mining – Vancouver, 1979).

- Tomašić, I. (1986): Analiza tektonskog sklopa u svrhu razrade i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Doktorska disertacija, 190 str., Sveučilište, Zagreb.
- Tomašić, I. (1989): Grafička metoda analize najpovoljnijeg položaja otkopne fronte u odnosu na tektonski sklop i stabilnost stijenske mase. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, vol. 1, 77-87, Zagreb.

Neobjavljeno:

- Jakić, V. (1989): Određivanje najprikladnijeg položaja otkopne fronte u odnosu na strukturni sklop primjenom računala, na primjeru ležišta dolomita dolje. Diplomski rad, 59 str., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

Optimum Front Position of Excavation in Relation to Structure Fabric Characteristics (Graphical Method by Means of Microcomputer)

I. Tomašić & V. Jakić

This paper describes an approach to the determination of the most favourable front position and to the stability problem, including field structural geology studies. Rock discontinuities e.g. faults, joints, bedding plains, fractures and fissures, play an important role in the exploitation and economics of open pit mines.

The research described in this article are based on the graphical method by Hoek and Bray (1974), and on experiences by Tomašić (1986 and 1989) and Jakić (1989).

The rock mass discontinuity, being one of the basic structure fabric characteristics, has been elaborated with mathematical and graphical method of analysing by means of computer. Mathematical and algorithmic model has been made for determination of optimum position of excavation front in relation to rock mass stability and structure fabric.

The program set SLOPE is developed as a supplement to the graphical method of determination of optimum working front position of excavation in relation to structural fabric characteristics and rock mass stability.

Starting from mathematical definition of the discontinuity and displayed critical zone elements, i.e. space between front position of excavation (common slope 70°) and the angle of friction (φ), till counting of prints in the zone, the whole problem is solved in modular form. The program is built up on modular principle, which at present time appeared to be a standard for organization of application software as well as for some other ones.

Discontinuity in rock masses, i. e. planar elements, have been shown in the paper by a system of ellipse equations. Their intersections are especially counted in the critical zone, grouped and optimized, and presented in numerical and graphical manner as analytical results.

The present method has obtained in this way in quality and efficiency, extending its application possibility in exploration, construction and exploitation phase of mineral deposits, as well as in some other kinds of mining-civil engineering activities in hard rock masses.