

## Prostorna analiza tektonskog sklopa primjenom računala

Ivan TOMASIĆ

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

Diskontinuiranost stijenske mase, kao jedno od osnovnih obilježja tektonskog sklopa, obrađena je metodama matematičke i grafičke analize, uz objedinjavanje značajki važnih za istraživanje, razradu i eksploataciju ležišta mineralnih sirovina, prvenstveno ležišta arhitektonsko-građevnog kamena.

Razvijen je i testiran jednostavan matematički model za analizu prostornog odnosa planarnih diskontinuiteta i programiran za računalo, čime je cijeli postupak osuvremenjen i ubrzan.

Mathematical and graphical methods have been used to process data on the rock mass discontinuity, which is one of the basic tectonic characteristics. It has been related to other important criterion for exploration, elaboration and exploitation of mineral raw-material deposits, with preference to architectural-building stone ones.

A simple mathematical model for spatial analysis of planar discontinuity has been developed, testified and programmed for microcomputer in order to make the whole procedure more efficient and applicable.

### UVOD

Diskontinuiranost stijenske mase jedno je od osnovnih obilježja tektonskog sklopa. Kao posljedica raznih usmjerenih pritisaka i napreznja u stijenskoj masi preoblikovani su raniji primarni sklopovi. Sklop je sastavljen od jedinica koje se mogu razlikovati, ali su međusobno povezane morfološkim, prostornim, funkcionalnim i genetskim karakteristikama i vezama. To je zbir svih elemenata u geološkoj građi nekog ležišta, koji se mogu prikazati pomoću geometrije. Radi boljeg usmjerenja istražnih radova i određivanja njihove gustoće, potrebno je već preliminarno, prije glavnih istraživanja, prvenstveno bušenja, prikupiti posebice elemente tektonskog sklopa.

Planarni diskontinuiteti ili prekidi u stijenskoj masi, slojne plohe i pukotine karakteriziraju stijensku masu s genetskih stanovišta i u uvjetima napreznja. Tektonski sklop direktno utječe na izvođenje građevinskih i hidrotehničkih objekata, a u rudarstvu na eksploataciju mineralnih sirovina u podzemnim radovima i na površinskim kopovima.

U ovom radu je izloženo izučavanje distribucije spomenutih elemenata u prostoru, uz određivanje stupnja izotropije odnosno anizotropije. Određena je količinska ocjena raspucanosti stijena, uz određivanje međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta, prvenstveno pu-

kotina, pojedinačno i u skupinama kao familije pukotina, koje su međusobno približno paralelne, najčešće istog genetskog porijekla.

Istraživanja se temelje na opažanjima i mjerenju obilja podataka o diskontinuitetima u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena: Kirmenjak, Kanfanar i Lucija u Istri; Rozalit, Crne Kričke, Karneol i Cvituš u Dalmatinskoj Zagori i Lici; Punta, Barbakan i Sivac na Braču; te Sivec kraj Prilepa u Makedoniji.

Iako karbonatnog sastava, ova se ležišta međusobno razlikuju po građi i tektonskom sklopu, što je predstavljalo posebnu povoljnost prilikom testiranja predložene metodologije prostorne analize tektonskog sklopa.

#### PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA TEKTONSKOG SKLOPA

Posljednjih dvadesetak godina istraživanju tektonskog sklopa pridaje se sve veća važnost. Različiti tehnički zahvati u čvrstim stijenama otvaraju niz problema vezanih za diskontinuiranost stijenske mase. Posebice su ti problemi izraženi u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena. Zbog toga su brojni istraživači razradili niz raznih metoda, uvodeći razne kriterije za ocjenu ponašanja i karakteriziranja stijenske mase.

U istraživanju ležišta arhitektonsko-građevnog kamena primjenjuje se ocjena cjelovitosti stijenske mase. Ona može biti linearna, površinska i volumna.

Prednost izračunavanja površinskog koeficijenta cjelovitosti pred linearnim, te njegovu usporedbu s volumnim koeficijentom, izložio je B. Crnković (1966).

Ocjena cjelovitosti omogućuje preračunavanje geoloških rezervi u eksploatacijske, što kasnije olakšava vrednovanje ležišta arhitektonsko-građevnog kamena.

Istraživački geološke faktore koji utječu na stabilnost stijenskih masa, F. D. Patton i D. U. Deere (1971) naglašavaju da je istraživanje diskontinuiteta u rješavanju spomenute problematike od presudnog značaja.

Distribuciju diskontinuiteta duž neke linije opažanja razmatrali su S. D. Priest i J. A. Hudson (1976). Koristeći negativnu eksponencijalnu distribuciju kao korelaciju između RQD (kakvoća stijenske mase) i srednje frekvencije diskontinuiteta na metar ( $\lambda$ ).

Istraživanjima korisnim u inženjerskoj praksi bavi se P. Lokin (1978), koji daje prijedlog metodologije ispitivanja geniteta ispucanosti stijenske mase na osnovi nabušene jezgre i prijedlog metodologije ispitivanja anizotropije ispucanosti otkrivenih stijenskih masiva.

Razmatrajući položaj razno orijentiranih diskontinuiteta u ravnini, J. A. Hudson i S. D. Priest (1979) su utvrdili da je frekvencija diskontinuiteta funkcija orijentacije linije opažanja u stijenskoj masi i na osnovu toga razvili distribuciju dužina blokova. Svoja su razmatranja proširili i na distribuciju površina između pukotina i blokova, nastalih kao produkt diskontinuiranosti stijenske mase u dvo i trodimenzionalnom smislu.

Bušenje s tri istražne bušotine u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena preporuča J. Vesel (1979), razvivši pritom odgovarajuće koeficijente kompaktnosti stijenske mase. Uvjet je da bušotine budu okomite na sisteme pukotina.

Davajući prednost prostornom odnosu diskontinuiteta I. Tomašić (1981) razrađuje odgovarajuću analizu za potrebe istraživanja ležišta arhitektonsko-građevnog kamena.

Iskorištenje stijenske mase u obliku zdravih blokova iz nekog ležišta arhitektonsko-građevnog kamena jedan je od glavnih pokazatelja za ocjenu ekonomičnosti i opravdanosti financijskih ulaganja. Pretpostavku da iskoristivost ovisi u prvom redu od tektonskog sklopa, tj. od intenziteta i gustoće raspucanosti, a u drugom redu od izbora i načina primjene odgovarajuće tehnologije eksploatacije, razradio je i prikazao pomoću dijagrama I. Tomašić (1982).

Kompjutorski model stijenske mase koji može razviti skrivene trodimenzionalne blok strukture razradio je P. M. Warburton (1983). Kompjutorski model, sposoban da pukotinski sklop razvija i prikaže numerički i grafički u dvije dimenzije, razradili su S. D. Priest i A. Samaniego (1983).

Da je iskoristivost ležišta arhitektonsko-građevnog kamena važan problem, potvrđuju J. Vesel i J. Lovrenčić (1985) koristeći istražne bušotine u svim mogućim pravcima i obradu diskontinuiteta pomoću računala.

#### RAZRADA PROSTORNE ANALIZE TEKTONSKOG SKLOPA

Prostorna analiza tektonskog sklopa razrađena je tako da bude prihvatljiva i dovoljno jasna, a rješava međusobni prostorni odnos diskontinuiteta u granicama od 0° do 90°. Razrađen je jednostavan matematički model, prilagođen specifičnim geološkim ulaznim podacima i programiran za digitalno računalo. Ovaj model tektonskog sklopa testiran je na većem broju terenskih podataka sakupljenih u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena i pokazao je zadovoljavajuće rezultate. Osnovni je cilj pri tome bio da se odrede kriteriji za vrednovanje povoljnosti, odnosno nepovoljnosti međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta.

#### PRISTUP MODELIRANJU

Tektonski sklop promatramo kao složeni geološki sustav. Pri njegovu modeliranju u potpunosti smo usmjereni na utvrđivanje mjere ( $\varphi$ ) odnosa između pojedinih diskontinuiteta, prema uhodanim i tradicionalno mjerljivim geološkim podacima na terenu kutevima  $\alpha$  i  $\beta$  (kut azimuta i kut nagiba). Kutevi su izolirani kao značajni objekti tektonskog sklopa s obzirom na njihovu postojeću bogatu bazu, koja također omogućuje efikasno testiranje modela. Formalni model tektonskog sklopa možemo simbolično prikazati pomoću relacije:

$$\varphi = X(\alpha, \beta)$$

Funkcija preslikavanja  $X$  predstavlja analitički opis zavisnosti predložene mjere  $\varphi$  (odnosa između diskontinuiteta) i kuteva  $\alpha$  i  $\beta$ . Premda

je u odnosu na sveukupne parametre koji utječu na određivanje kuta  $\varphi$ , predloženi model kvalitativno jednostavno građen, njegovo testiranje na primjeru iz baze kuteva  $\alpha$  i  $\beta$  pokazalo je značajno poklapanje sa stvarnim stanjem.

Budući da se navedeni model bazira na velikom broju numeričkih podataka, realiziran je za obradu na digitalnom računalu. U procesu obrade podataka računalo je korišteno interaktivno, s obzirom na potrebu čestog odlučivanja o prihvatljivosti pojedinih rješenja.

#### ULAZNO IZLAZNI PODACI

Osnovni ulazni podaci za model jesu geološki podaci mjereni »in situ« u kamenitim brdskim masivima, kamenolomima, odnosno u prirodnom uvjetima naprezanja, heterogenosti i anizotropije stijenske mase. To su u geološkim krugovima dobro poznati podaci o pružanju i nagibu diskontinuiteta, odnosno planarnih elemenata, tj. kutevi  $\alpha$  i  $\beta$ . U praksi  $\alpha$  je vrijednost azimuta i varira od  $0^\circ$  i  $360^\circ$ , a  $\beta$  je kut koji karakterizira kut nagiba i varira od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ .

Tako na primjer imamo:

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_n$$

$$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \dots, \beta_j, \dots, \beta_n$$

Kutevi  $\alpha_j$  i  $\beta_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) čine »par«, odnosno uzorak za razmatranje, koji može definirati prostorni položaj svakog diskontinuiteta, odnosno planarnog elementa. Matematički gledano to su ravnine, odnosno skupovi ravnina koje presijecaju jedan poznati, istraživanjem zahvaćen volumen stijenske mase, koja je uzeta u obzir za razmatranje i analizu. Takav skup ravnina nalik je na svežanj ravnina. Također, u nekim slučajevima, pojedini sistemi ravnina približavaju se položaju nalik na pramen ravnina.

Broj ulaznih podataka ( $n$ ) izmjerenih na terenu najčešće iznosi 100 do 200. Vrlo dobri rezultati mogu se postići i kod broja podataka od 50 do 100.

Izračunavanje broja mogućih presjeka slijedeći je korak u analizi tektonskog sklopa. Na primjer, ako razmatramo skup od  $n$  diskontinuiteta, onda je broj ukupnih presjeka jednak broju kombinacija od  $n$  elemenata,  $r$ -tog razreda bez ponavljanja:

$$K = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (1)$$

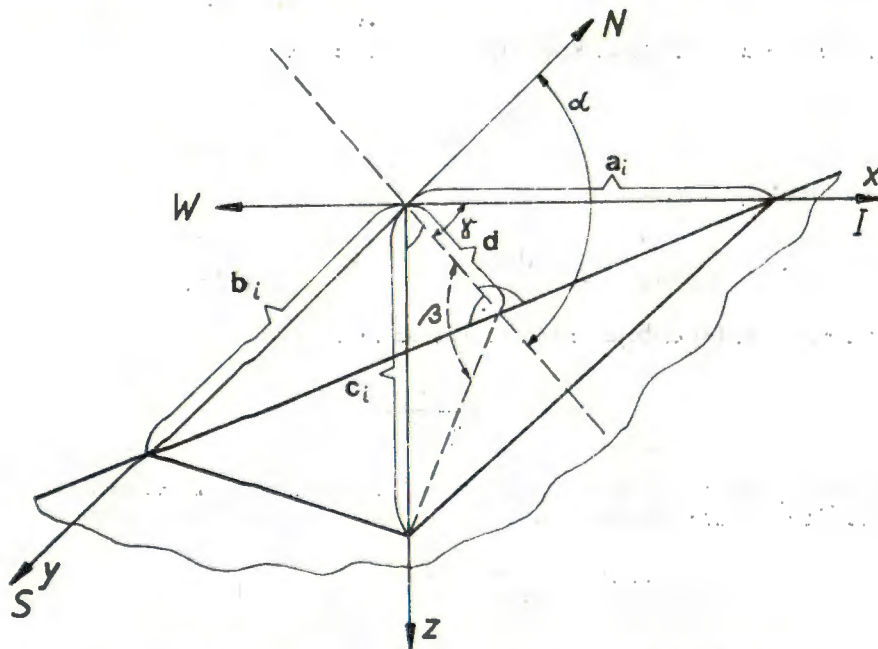
Broj razreda ( $r$ ) je stalno jednak 2, jer par čine dva diskontinuiteta koji se međusobno sijeku. Prema tome, u koliko unutar tektonskog sklopa stijenske mase tražimo i razmatramo presjeke između  $n$  različitih diskontinuiteta, za uzorke od po dva elementa, onda izraz (1) pišemo u obliku:

$$K = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2)$$

Prema tome, osnovicu za razmatranje i analizu međusobnog prostornog odnosa pojedinih diskontinuiteta predstavlja ukupni broj dobivenih presjeka, a on je definiran brojem kombinacija prema (2).

#### MODEL TEKTONSKOG SKLOPA STIJENSKE MASE

Jedan od osnovnih problema u razradi analize tektonskog sklopa proizlazi iz specifičnosti geoloških podataka izmjerenih na terenu, tj. kuteva  $\alpha$  i  $\beta$ , čiji je odnos osnova za dobivanje odgovarajućeg algoritma za izračunavanje prave veličine presjeka između dvije ili više ravnina.



Sl. 1. Prikaz diskontinuiteta kao ravnina u koordinatnom sistemu

Fig. 1. Display of planar discontinuities in co-ordinate system

Položaj svakog diskontinuiteta unutar tektonskog sklopa stijenske mase možemo prikazati kao ravninu u Descartesovom pravokutnom koordinatnom sistemu. Pri tome je položaj svake ravnine definiran ulaznim podacima, kutevima  $\alpha$  i  $\beta$  (azimut i veličina upada) kako je to vidljivo na sl. 1.

Općenito, jednačba ravnine u segmentnom obliku glasi:

$$\frac{x}{a_i} + \frac{y}{b_i} + \frac{z}{c_i} = 1, \quad (3)$$

pri čemu su  $a_i$ ,  $b_i$  i  $c_i$  odsjeci koje čini ravnina s koordinatnim osima.

Koristeći sl. 1 možemo izraziti koeficijente  $a_i$ ,  $b_i$  i  $c_i$  pomoću poznatih kuteva  $\alpha$  i  $\beta$ .

U tom smislu izraziti ćemo prvo veličinu  $d$  koja predstavlja razmak između ishodišta i ravnine  $R_i$  ali u ravnini  $x-y$ :

$$d = \frac{c_i}{\operatorname{tg}\beta} \quad (4)$$

Koeficijent  $a_i$  se može izraziti kao:

$$a_i = \frac{d}{\cos\gamma} \quad \text{odnosno} \quad a_i = \frac{c_i}{\cos\gamma \operatorname{tg}\beta}$$

Kako je  $\gamma = \alpha - 90^\circ$  to će koeficijent  $a_i$  biti jednak:

$$a_i = \frac{c_i}{\sin\alpha \operatorname{tg}\beta} \quad (5)$$

Iz slike nadalje slijedi:

$$b_i = \frac{d}{\cos(90 - \gamma)} \quad \text{odnosno} \quad b_i = \frac{d}{\cos(180 - \alpha)}$$

Koristeći izraz (4) dobije se konačni izraz za  $b_i$ :

$$b_i = \frac{c_i}{\operatorname{tg}\beta \cos\alpha} \quad (6)$$

Uvrštavanjem vrijednosti dobivenih odsječaka  $a_i$  i  $b_i$  u segmentni oblik jednadžbe ravnine (3) dobivamo:

$$\frac{x \sin\alpha \operatorname{tg}\beta}{c_i} - \frac{y \operatorname{tg}\beta \cos\alpha}{c_i} + \frac{z}{c_i} = 1 \quad (7)$$

Opći oblik jednadžbe ravnine za parove kuteva ( $\alpha_i$  i  $\beta_i$ ) može se pisati kao:

$$x \sin\alpha_i \operatorname{tg}\beta_i - y \operatorname{tg}\beta_i \cos\alpha_i + z - c_i = 0 \quad (8)$$

gdje je:

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Jednadžbe dviju ravnina, koje u ovom slučaju predstavljaju dva diskontinuiteta možemo pisati u obliku:

$$A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0 \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$A_j x + B_j y + C_j z + D_j = 0 \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

uz uvjet da je  $i \neq j$ .

Kut između dviju ravnina, a u ovom slučaju između diskontinuiteta može se odrediti iz izraza:

$$\cos\varphi_{i,j} = \frac{A_i A_j + B_i B_j + C_i C_j}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2} \cdot \sqrt{A_j^2 + B_j^2 + C_j^2}} \quad (10)$$

gdje je  $\varphi_{i,j}$  kut između i-tog i j-tog diskontinuiteta.

Iz jednadžbe (8) mogu se izraziti koeficijenti smjera normale na ravninu:

$$\begin{aligned} A_i &= \sin\alpha_i \operatorname{tg}\beta_i, \\ B_i &= \operatorname{tg}\beta_i \cos\alpha_i, \\ C_i &= 1 \end{aligned} \quad (11)$$

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti za koeficijente  $A_i$ ,  $B_i$  i  $C_i$  u (10) slijedi:

$$\cos\varphi_{i,j} = \frac{\sin\alpha_i \operatorname{tg}\beta_i \sin\alpha_j \operatorname{tg}\beta_j + \operatorname{tg}\beta_i \cos\alpha_i \operatorname{tg}\beta_j \cos\alpha_j + 1}{\sqrt{(\sin\alpha_i \operatorname{tg}\beta_i)^2 + (\operatorname{tg}\beta_i \cos\alpha_i)^2 + 1} \cdot \sqrt{(\sin\alpha_j \operatorname{tg}\beta_j)^2 + (\operatorname{tg}\beta_j \cos\alpha_j)^2 + 1}} \quad (12)$$

Izraz (12) je pogodan za izračunavanje kuta između dvije ravnine, odnosno za međusobni prostorni položaj diskontinuiteta. U gornjem izrazu koriste se kao ulazni podaci samo geološke karakteristike, kutevi  $\alpha$  i  $\beta$ . Dobiveni izraz (12) predstavlja osnovu matematičkog modela tektonskog sklopa, te je korišten kao podloga za kreiranje algoritma u programu za elektroničko računalo.

#### OPTIMIRANJE MEĐUSOBNOG PROSTORNOG ODNOSA DISKONTINUITETA

Izračunavanje međusobnog prostornog odnosa između diskontinuiteta svodi se na određivanje odnosa između kuteva  $\alpha$  i  $\beta$ , koji predstavljaju izmjerene podatke na terenu.

Prvi uvjet da diskontinuiteti budu optimalno međusobno smješteni jest da budu paralelni i da razmak između njih bude što veći.

Uvjet da budu paralelni može se izraziti kao:

$$\cos\varphi_{i,j} = 1 \quad \text{ili} \quad \frac{A_i}{A_j} = \frac{B_i}{B_j} = \frac{C_i}{C_j} \quad (13)$$

Koristeći izraze (11) gornji izraz može se pisati u obliku:

$$\frac{\sin\alpha_i \operatorname{tg}\beta_i}{\sin\alpha_j \operatorname{tg}\beta_j} = \frac{\operatorname{tg}\beta_i \cos\alpha_i}{\operatorname{tg}\beta_j \cos\alpha_j} = 1 \quad (14)$$

Ako razmak između diskontinuiteta označimo veličinom  $l$ , gdje je  $l = l_1 - l_j$ , tada se uvjet maksimalnog razmaka može simbolično izraziti:

$$l \rightarrow \max \quad (15)$$

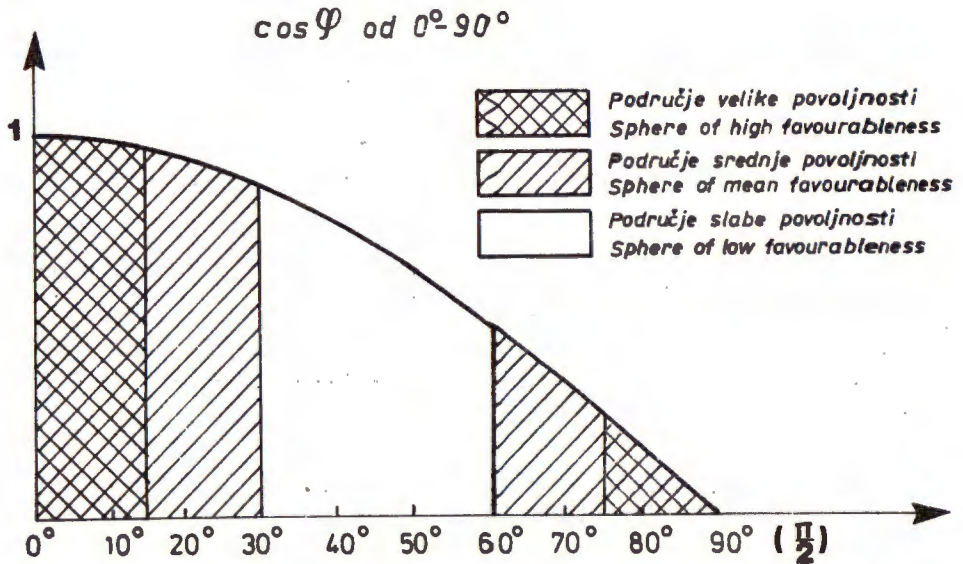
Drugi optimalni uvjet jest da diskontinuiteti budu međusobno okomiti i da razmak između njih bude što veći:

$$\cos\varphi_{i,j} = 0 \quad \text{ili} \quad A_i A_j + B_i B_j + C_i C_j = 0 \quad (16)$$

$$1 \rightarrow \max \quad (17)$$

Uz izraze (11) gornji uvjet može se pisati u obliku:

$$\sin\alpha_i \operatorname{tg}\beta_i \cdot \sin\alpha_j \operatorname{tg}\beta_j + \operatorname{tg}\beta_i \cos\alpha_i \cdot \operatorname{tg}\beta_j \cos\alpha_j + 1 = 0 \quad (18)$$



Sl. 2. Grafički prikaz stupnjevanja povoljnosti

Fig. 2. Graphical display of favourableness degree

Prema tome ako  $\cos\varphi \rightarrow 0$  diskontinuiteti su približno međusobno okomiti, a ako  $\cos\varphi \rightarrow 1$  onda su približno međusobno paralelni. Ukoliko je razmak između njih povoljan, tada su zadovoljeni svi uvjeti optimalnosti. Grafički prikaz stupnjevanja povoljnosti dat je na sl. 2.

Ovi uvjeti za optimalni međusobni položaj vrijede prvenstveno za odnose između diskontinuiteta kod ležišta arhitektonsko-građevnog kamena, jer međusobni prostorni odnos diktira oblik blokova, a razmak između diskontinuiteta diktira veličinu blokova koji bi se mogli vaditi.

#### TESTIRANJE MODELA (I)

Da bi se izvršilo odgovarajuće testiranje prethodno predloženog modela, obzirom na specifičnost zamisli i potrebe istraživanja, bilo je po-



trebno sakupiti određene uzorke, odnosno na terenu izmjeriti kuteve  $\alpha$  i  $\beta$  koji sačinjavaju osnovne ulazne podatke u ovoj metodici istraživanja tektonskog sklopa.

Podaci su prikupljeni na terenu, na ogoljelim dijelovima stijenske mase, na većim izdancima, te na otvorenim profilima radilišta starih i novih kamenoloma.

Da bi se rezultati testiranja predložene i razrađene prostorne analize tektonskog sklopa mogli uspoređivati s nekom od poznatih metoda, prvobitno su svi podaci za pojedina ležišta obrađeni klasičnim i dobro poznatim načinom prikazivanja diskontinuiteta pomoću konturnog dijagrama polova normala na pukotine, koji se uglavnom radi pomoću polarne i ekvatorijalne mreže (po Schmidtu), te pomoću brojačke mreže po M. Dimitrijeviću (1978).

U ovom radu konturni su dijagrami, a i neki dijelovi ostalih analiza, izrađeni pomoću elektroničkog računala IBM 1130 (memorija 8k riječi).

Izrada programa za konstrukciju konturnog dijagrama (stereografskog dijagrama), raznih rotacija i presjeka ravnina, trajala je nekoliko godina. Autori navedenog programa su D. Bonyun i G. Stevens (1971). Program je izrađen u Fortranu. Jedna od glavnih značajki programa je njegov vjerni prikaz uzetih polova i to što nije značajno različit od izrađenog standardnom tehnikom rada. Upotrebljena je Lambert-Schmidtova projekcija jednakih površina. Gustoće su mjerene u postocima od ukupnog broja polova na 1% površine cijelog dijagrama. Svaki i najmanji utjecaj točaka koje su u blizini, odražava se na postotak polova, odnosno na gustoću i izražajnost pojedinih preferiranih dijelova konturnog dijagrama.

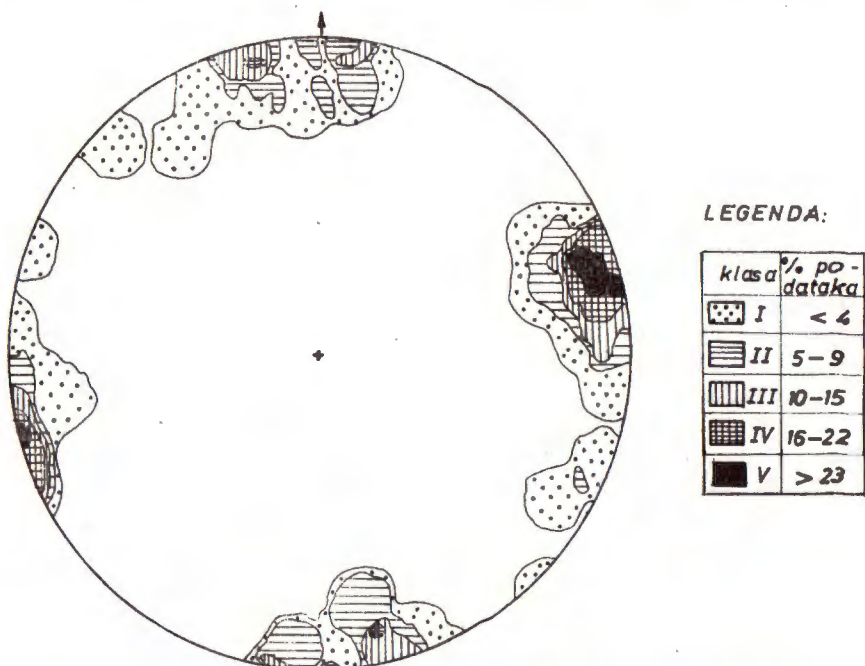
Od devetnaest izrađenih i obrađenih primjera izabrana su tri.

Na konturnom dijagramu polova normala pukotina ležišta *Cvituša* u Lici (sl. 3.) uočava se veoma pravilan međusobni prostorni odnos pukotina, a ako se u analizu uključi i položaj slojevitosti nagiba 355/8 do 5/8 onda presjecišta većine diskontinuiteta teže prema 90° odnosno 0°.

Drugi primjer (sl. 4.) koji se odnosi na ležište *Sivec* kraj Prilepa (polje 8), prikazuje veliko i nepravilno raspršenje pukotina, s niskim stupnjem povoljnosti međusobnog prostornog odnosa. Ovaj je dijagram veoma teško točno procijeniti. Škriljavost s nagibom od 29° nije česti planarni element duž kojeg dolazi do prirodnog odvajanja blokova stijenske mase.

Treći primjer (sl. 5.) za ležište *Karfanar* u Istri (radilište II) prikazuje povoljniji prostorni odnos pukotina, a ako se u analizu uključi slojevitost koja je gotovo horizontalna, onda presjecišta većine diskontinuiteta teže prema 90° odnosno 0°.

Između svih obrađenih ležišta mogli bi izdvojiti još poneki dijagram i istaknuti uglavnom opisno razlike između njih. Osnovni je cilj kod istraživanja da se poboljša analiza podataka konturnog dijagrama, određivanjem prostornog odnosa između svih diskontinuiteta u ležištu (I. Tomašić, 1981) ili pak istraživanje novih mogućnosti i metoda analize postojećih, istih ulaznih podataka, na drugi način i drugom tehnikom, pri čemu bi bili lišeni subjektivnosti u procjeni tektonskog sklopa prikazanog konturnim dijagramom.



Sl. 3. Konturni dijagram polova normala pukotina, kam. Cvituša

Fig. 3. Geological stereo net diagram, quarry Cvituša

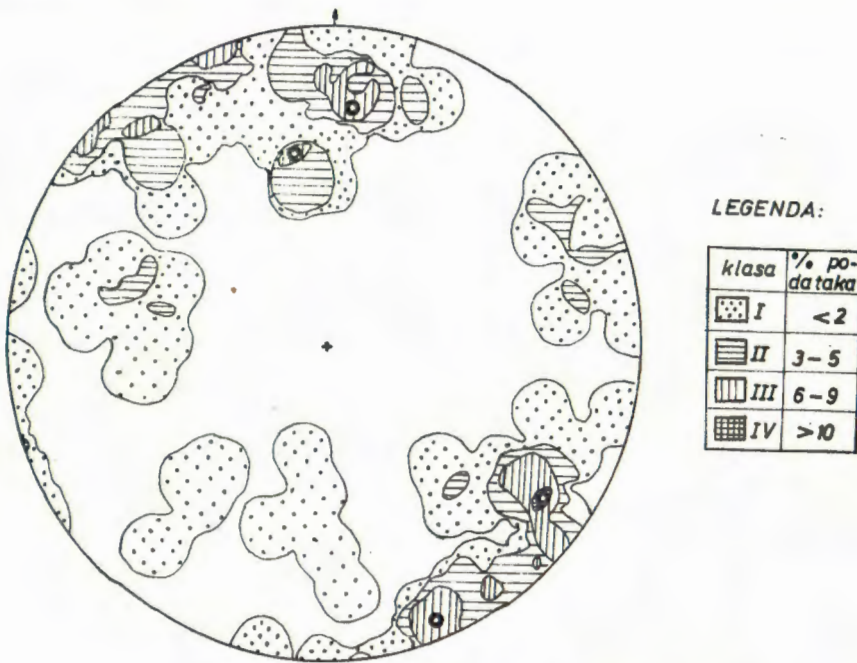
U tom pogledu izrađen je, prikazan i opisan matematički model s odgovarajućim programskim sistemom TEKTO za elektroničko računalno. Ulazni podaci isti su kao i u prethodnom slučaju, osim što su im pridodane vrijednosti za slojevitost, kako bi rezultati o međusobnom prostornom odnosu diskontinuiteta bili što realniji tj. da odgovaraju stvarnom stanju u ležištu.

Dobiveni rezultati pojedinih presjeka između diskontinuiteta kreću se u granicama od  $0^{\circ}$  do  $180^{\circ}$ . Obzirom da su za analizu potrebne vrijednosti kuteva u granicama od  $0^{\circ}$  do  $90^{\circ}$ , zbog suplementarnosti kuteva, odbijaju se sve vrijednosti kuteva veće od  $90^{\circ}$ .

U toku analize dobiveni su odgovarajući histogrami. Svaki histogram prikazuje distribuciju frekvencija kuteva  $\varphi$ , pri čemu su vrijednosti relativnih frekvencija prikazane na ordinati, a vrijednosti kuteva  $\varphi$  prikazane su na apscisi. Vrijednosti kuteva  $\varphi$  kreću se od  $0^{\circ}$  do  $90^{\circ}$ , a raspodjeljene su u razrede od po  $5^{\circ}$ .

Proračun i obrada podataka izvršeni su kako to prikazuje dijagram toka na sl. 6.

Ukoliko, na primjer, istaknemo histogram diskontinuiteta *kamenoloma Sivec Prilep — polje 8* (sl. 7), vidimo da dobivena distribucija ima više ili manje asimetričan oblik zvona. Ovaj je histogram dobiven analizom 5995 presjeka diskontinuiteta (kuteva prostornog odnosa  $\varphi$ ), do-



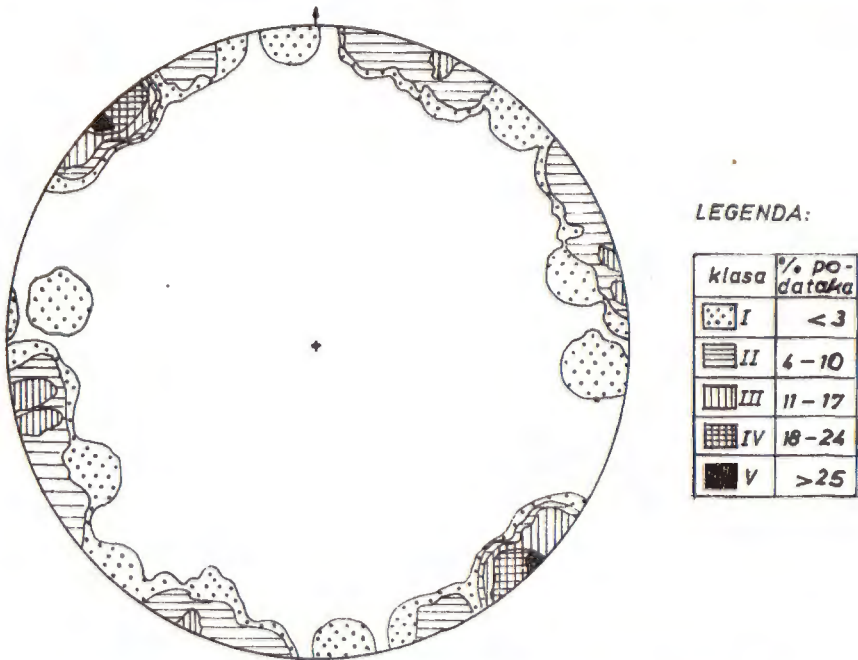
Sl. 4. Konturni dijagram polova normala pukotina, kam. Sivec

Fig. 4. Geological stereo net diagram, quarry Sivec

bivenih na osnovi analize 110 terenskih podataka kuteva  $\alpha$  i  $\beta$ . On pokazuje najveće grupiranje vrijednosti promatranog skupa presjeka od  $60^\circ$  do  $65^\circ$ . Ovaj maksimum ne ističe se posebno od ostalih vrijednosti distribucija frekvencija kuteva  $\varphi$ . Prema  $0^\circ$  odnosno prema  $90^\circ$  smanjuje se relativna frekvencija povoljnih presjeka između diskontinuiteta, zbog čega ovaj, istraživani i analizirani tektonski sklop ne pokazuje neke posebno povoljne karakteristike u vezi međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta.

Primjer distribucije diskontinuiteta (sl. 8) u *komenolomu Cvituša* dobiven je iz analize 3655 kuteva prostornog odnosa  $\varphi$ . Ovaj histogram ima oblik parabole. Maksimalne vrijednosti skupa grupiraju se u razredima  $10^\circ$  do  $15^\circ$  i od  $75^\circ$  do  $90^\circ$ , što je izuzetno povoljno. Ovaj histogram pokazuje ujedno i jedan od najpovoljnijih slučajeva međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena. Diskontinuiteti pokazuju najčešće tendenciju presijecanja u području prema  $90^\circ$ , odnosno prema  $0^\circ$ , što je karakteristika izuzetno povoljnih uvjeta za vađenje pravilnih blokova u ležištima.

Istaknuti se može i primjer distribuiranja frekvencija diskontinuiteta (sl. 9) dobiven analizom podataka u *kamenolomu Kanfanar (radilište II)*. Ovaj histogram dobiven je analizom 1326 presjeka diskontinuiteta (kuteva prostornog odnosa), te isto pokazuje jedan od najpovoljnijih primjera. Veliki broj presijecanja diskontinuiteta pretežno je u pod-



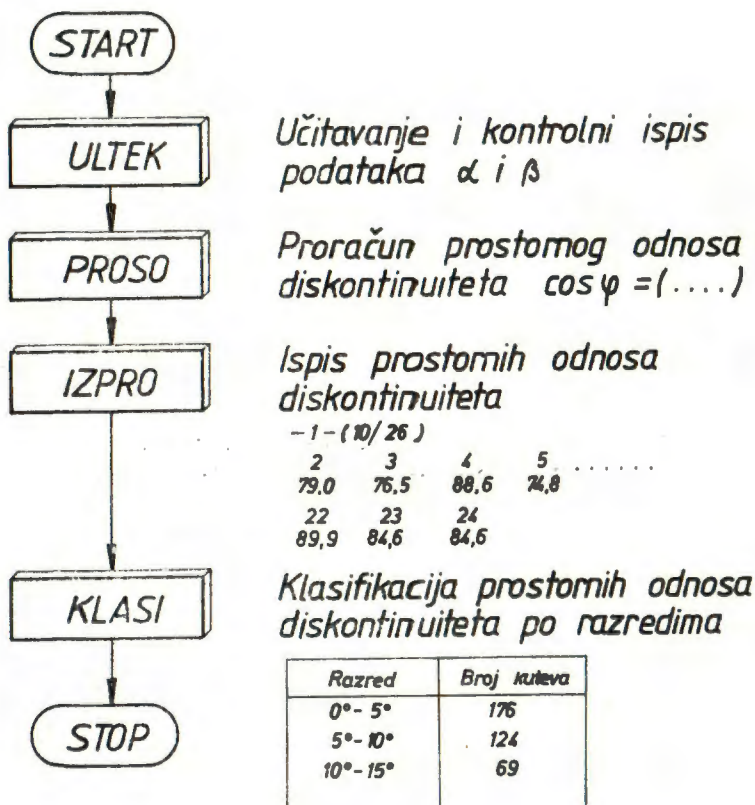
Sl. 5. Konturni dijagram polova normala pukotina, kam. Kanfanar  
Fig. 5. Geological stereo net diagram, quarry Kanfanar

ručju od  $80^\circ$  do  $90^\circ$  odnosno teži prema  $90^\circ$ , te dijelom u području  $60^\circ$  do  $75^\circ$  i dijelom prema  $0^\circ$ , uglavnom upućuje na elemente tektonskog sklopa s povoljnim utjecajem na eksploataciju pravilnih blokova arhitektonsko-gradevnog kamena.

Kriterij povoljnosti presjeka diskontinuiteta izabran je vrlo jednostavno. Povoljno je da se diskontinuiteti međusobno sijeku pod kutem što više prema  $90^\circ$ , ili da su međusobno paralelni, tj. da im veličina presjeka teži prema  $0^\circ$ . Paralelnost diskontinuiteta može posebno biti naglašena između pukotina u jednom pukotinskom sistemu ili pak kod ravnina slojevitosti, koje su, u pravilu, međusobno paralelne.

Rezultati prostorne analize tektonskog sklopa za pojedina ležišta posebno su prikazani u tab. I. Tablica sadrži broj ulaznih podataka za pojedina ležišta, broj dobivenih i analiziranih kuteva presjeka ili prostornog odnosa mjenjenih diskontinuiteta, srednju vrijednost kuta  $\varphi$ , te redosljed povoljnosti prostornog odnosa prema kutu  $\varphi_{br}$  i prema ocjeni dobivenih histograma (distribucija frekvencija kuteva  $\varphi$ ). Ova tablica pokazuje da dobivena srednja vrijednost kuta  $\varphi$  ni na što posebno ne ukazuje, za razliku od analize i ocjene dobivenih histograma, na kojima se distribucija kuteva presjeka  $\varphi$  daleko bolje uočava. U zadnjoj koloni nalazi se procjena redoslijeda povoljnosti ležišta. Prema ovoj procjeni u prvom planu su ležišta (kamenolomi): Rozalit, Kanfanar (radilište II), Kirmenjask, Cvituša i Kanfanar (radilište III).

## PROGRAM „TEKTO“

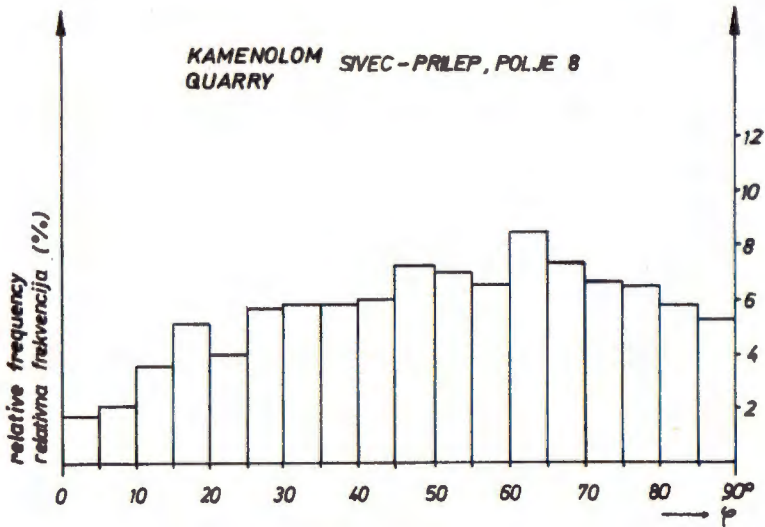
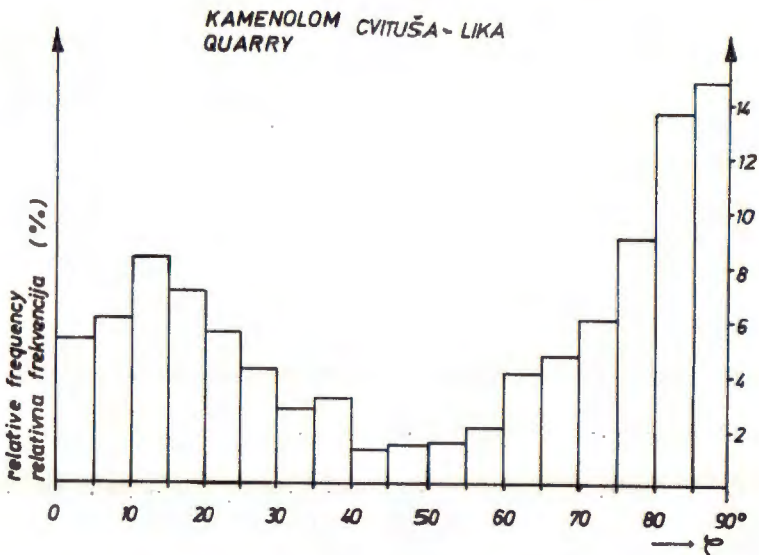


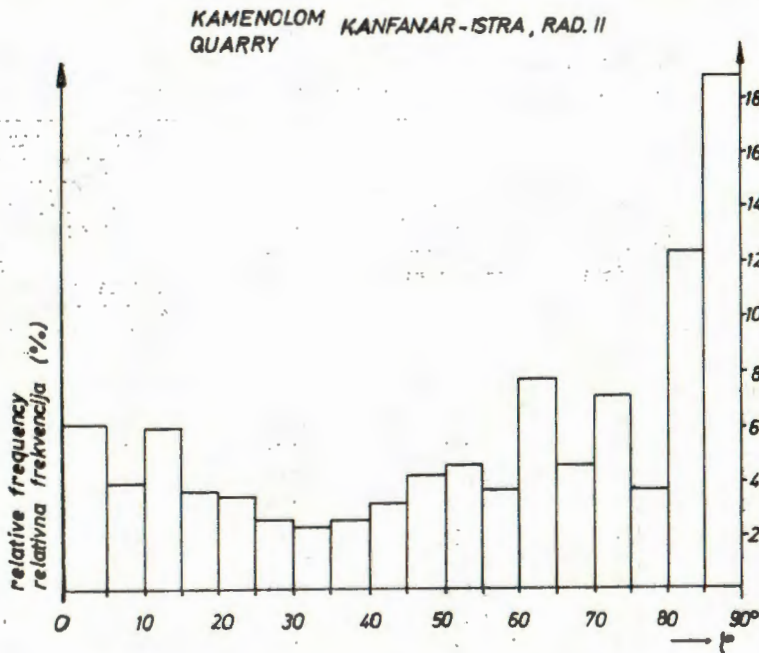
Sl. 6. Blok shema programa

Fig. 6. Block program schema

### OSTALI KRITERIJI POTREBNI ZA ANALIZU

Da bi se otklonila subjektivnost u ocjeni kod prostorne analize tektonskog sklopa uvedena je reporna krivulja, podaci su aproksimirani odgovarajućim krivuljama pomoću polinomne regresije, a za usporedbu između pojedinih krivulja korišten je kriterij za kvadratno i apsolutno odstupanje. Oblik histograma, odnosno poligona frekvencija, odraz je međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta. Da bi se mogla izvesti usporedba između pojedinih tipova histograma ili poligona frekvencija potrebno je iste aproksimirati s odgovarajućim krivuljama pomoću polinomne regresije. U tu svrhu analizom varijance određeni

Sl. 7. Distribucija frekvencija kuteva  $\varphi$ Fig. 7. Distribution of angle  $\varphi$  frequenciesSl. 8. Distribucija frekvencija kuteva  $\varphi$ Fig. 8. Distribution of angle  $\varphi$  frequencies

Sl. 9. Distribucija frekvencija kuteva  $\varphi$ Fig. 9. Distribution of angle  $\varphi$  frequencies

su drugi, treći i četvrti stupanj polinomne regresije s odgovarajućim pripadnim koeficijentima.

Za usporedbu između reperne krivulje i krivulja dobivenih korištenjem podataka za pojedina ležišta, izabran je polinom drugog reda, kvadratna parabola s vertikalnom osi simetrije, čije je tjeme s koordinatama (0,5; 0) i maksimalnom vrijednosti u točki (0; 1).

Ova reperna parabola ima oblik povoljniji od bilo koje krivulje dobivene korištenjem mjerenih i obrađenih podataka s terena, što ih npr. pokazuju histogrami za kamenolome Cvituša (sl. 8) i Kanfanar (sl. 9). Ona u svim svojim dijelovima prikazuje povoljniji prostorni odnos diskontinuiteta od bilo kojeg dobivenog na osnovu analize ostalih terenskih podataka (tab. I). U središnjem je dijelu ispupčenija u odnosu na ostale terenski dobivene krivulje. U rubnim je dijelovima također povoljnija od krivulja dobivenih analizom terenskih podataka. Da bi se dobio redosljed povoljnosti prostornog odnosa diskontinuiteta za pojedina ležišta, ova je krivulja korištena kao reperna u slijedećim primjerima analiza tektonskog sklopa. Vrednovanjem mjere disperzije od reperne krivulje dobiva se kvantitativna vrijednost kvalitete prostornog odnosa diskontinuiteta u nekom ležištu arhitektonsko-građevnog kamena.

Dakle, ako normaliziramo relativnu frekvenciju pomoću maksimalne vrijednosti  $Rf = 25$  i kut  $\varphi$  s maksimalnom vrijednošću  $\frac{\pi}{2}$  dobivamo jednadžbu raspodjele u obliku:

Tabla — Table I.  
 Rezultati analize prostornog odnosa diskontinuiteta  
 Results of spatial analysis of planar discontinuities

Kamenolom Quarry	Broj podataka Number of data	Broj kuteva Number of angles	$\varphi$ sr. $\varphi$ mean	Redoslijed određivanja povoljnosti Order of favourableness determination	
				prema $\varphi$ according to $\varphi$ mean	prema ocjeni hist. according to hist. estimation
<b>Sivec (Prilep)</b>					
polje 1	100	4 950	47,1°	12	14
polje 2	60	1 770	57,7°	7	10
polje 3	91	4 095	47,9°	9	13
polje 4	127	8 001	47,6°	10	12
polje 5	129	8 256	47,6°	11	11
polje 6	130	8 385	57,7°	6	16
polje 7	72	2 556	43,6°	15	18
polje 8	110	5 995	50,7°	5	15
Punta	81	3 240	40,9°	16	7
Barbakan	129	8 256	30,1°	19	9
Sivac (Brač)	89	3 916	38,3°	18	17
Cvituša	86	3 655	51,5°	4	4
Rozalit	149	11 026	49,7°	8	1
Crne Kričke	41	820	40,5°	17	19
Karneol	107	5 671	45,3°	14	6
<b>Kanfanar:</b>					
radilište II	52	1 326	55,1°	1	2
radilište III	66	2 145	52,6°	2	5
Kirmenjask	59	1 711	52,6°	3	3
Lucija	42	861	46,7°	13	8

$$\frac{Rf}{25} = 4 \left| \frac{\varphi}{90} \right|^2 - 4 \left| \frac{\varphi}{90} \right| + 1 \quad (19)$$

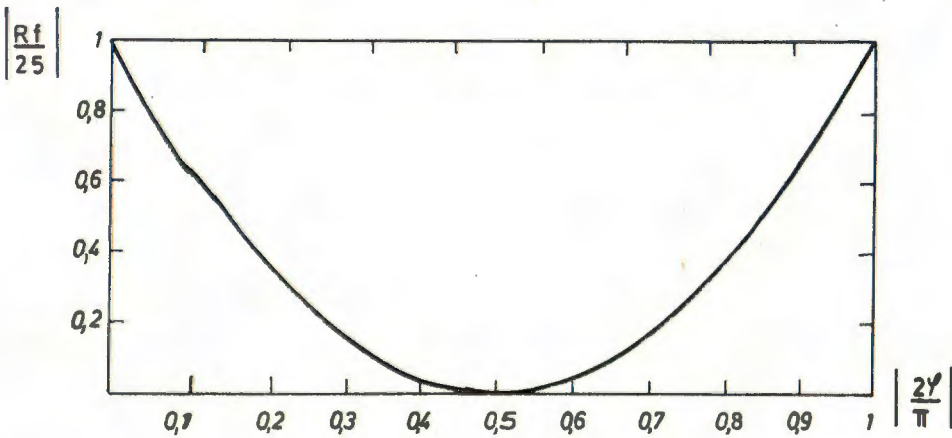
a koja je povoljna za daljnju upotrebu. Dobivena parabola (19) je već navedena kvadratna parabola jednadžbe:

$$y = 100 x^2 - 100 x + 25 \quad (20)$$

Grafički prikaz parabole (19) nalazi se na sl. 10. gdje je na apscisi normaliziran kut  $\frac{2\varphi}{\pi}$ , a na ordinati normalizirana relativna frekvencija

$$\frac{Rf}{25}$$





Sl. 10. Reperna krivulja (kvadratna parabola)

Fig. 10. Standard curve (square parabola)

Zbog prilagođavanja potrebama geoloških istražnih radova, za dalju upotrebu na osi ordinata biti će označene relativne frekvencije u području od 0 do 25, a na osi opscisa vrijednosti kuta međusobnog prostornog odnosa  $\varphi$  u području od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ .

Nakon prostorne analize tektonskog sklopa preostali su podaci o distribuciji relativnih frekvencija kuteva i njihove distance po razredima od po  $5^\circ$ , počevši od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Veliki broj mjerenih i obrađenih podataka, dalje je analiziran da se vidi tendencija vrijednosti podataka u različitim primjerima. U tom pogledu bilo je potrebno koristiti interpolaciju izvan dobivenih vrijednosti i ekstrapolacijom opravdati niz podataka, te dati prikaz trenda ili procjene karakteristika analize koja bi mogla biti od interesa za geološku interpretaciju. Zbog prethodnih zahtjeva upotrebljen je statistički test nazvan analiza regresije. U tom smislu provedena je procjena kojom se izražava odnos između prostornog kuta  $\varphi$  i pripadnih razreda.

Postoji nekoliko pogodnih aproksimirajućih jednadžbi, a jedna od najviše korištenih je polinomna ekspanzija, koju u općem obliku možemo pisati kao:

$$Y_i = C_1 + C_2 X_i + C_3 X_i^2 + C_4 X_i^3 + \dots + C_m X_i^m \quad (21)$$

gdje su  $C_m$  — koeficijenti koji se određuju polinomnom regresijom. Što je višeg stupnja krivulja aproksimacije, to će obuhvatiti više točaka koje predstavljaju analizirane podatke. Polinomne jednadžbe dobiju se korištenjem metode najmanjih kvadrata, a proces je nazvan uređenje krivulje (curve fitting), J. C. Davis (1973).

Osnovni princip metode najmanjih kvadrata može se simbolički opisati relacijom:

$$\sum_{i=1}^k (Z_p - Z_i)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (22)$$

gdje se indeks »p« odnosi na teoretske ili repere vrijednosti funkcije Z. Indeks »i« se odnosi na izračunate vrijednosti funkcije Z. Prema tome, analizom pomoću polinomne regresije odnosno varijance određeni su drugi, treći i četvrti stupanj polinomne regresije s odgovarajućim pripadnim koeficijentima. U našem slučaju najinteresantnija je aproksimacija polinom drugog stupnja, jer je reporna krivulja također polinom drugog stupnja dana jednadžbom (19),

Na taj je način moguće pojedinačno analizirati svaki tektonski sklop uspoređujući ga s repornim, kako bi se dobila mjera povoljnosti prostornog odnosa diskontinuiteta.

Aproksimativna krivulja dobivena polinomnom regresijom uspoređuje se s repornim polinomom, odnosno kvadratnom parabolom na dva načina: 1) pomoću kriterija koji koristi apsolutne vrijednosti:

$$\sum_{i=1}^N |y_i - Z_i| \rightarrow \min, \quad (23)$$

2) kriterija koji koriste kvadrate odstupanja:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - Z_i)^2 \rightarrow \min, \quad (24)$$

gdje su  $y_i$  ordinate reporne krivulje, a  $Z_i$  ordinate izračunate vrijednosti dobivene polinomnom regresijom ili vrijednosti iz poligona frekvencija prethodno dobivenih i obrađenih podataka međusobnom prostornom analizom tektonskog sklopa. Ovo je samo osnovni princip izračunavanja koji je primijenjen konkretno prilikom istraživanja i procjene tektonskog sklopa pojedinih ležišta arhitektonsko-gradevnog kamena u odnosu na reporni.

#### TESTIRANJE MODELA (II)

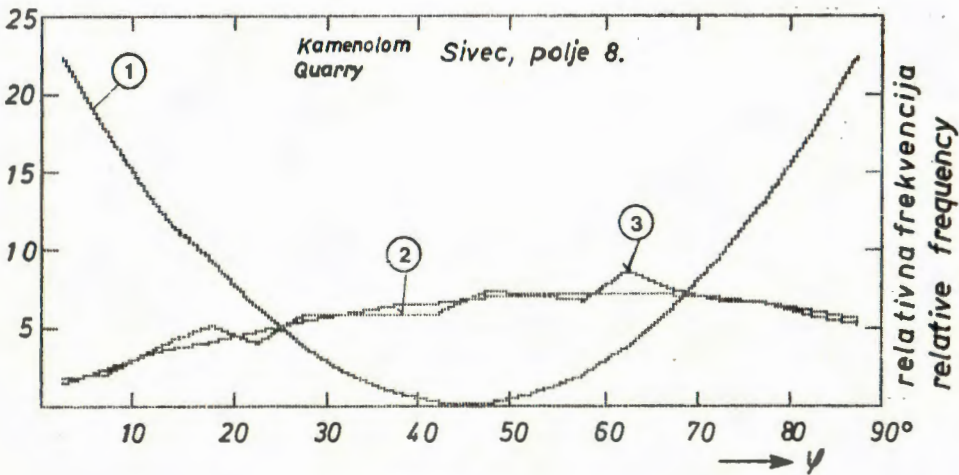
Da bi se otklonila subjektivnost u ocjeni rezultata analize podataka pomoću konturnih dijagrama i histograma distribucija frekvencija kuteva  $\varphi$  (prostorna analiza tektonskog sklopa), izrađen je odgovarajući program za testiranje i uspoređivanje raznih mogućnosti kod dobivenog modela.

Podaci o dobivenim relativnim frekvencijama obrađeni su pomoću polinomne regresije, pri čemu su dobiveni odgovarajući koeficijenti za aproksimacije polinoma drugog, trećeg i četvrtog stupnja. Zbog mogućnosti uspoređivanja izabrana je odgovarajuća reporna krivulja (kvadratna parabola) na temelju dosadašnjih iskustava i analiza podataka s raznih lokaliteta.

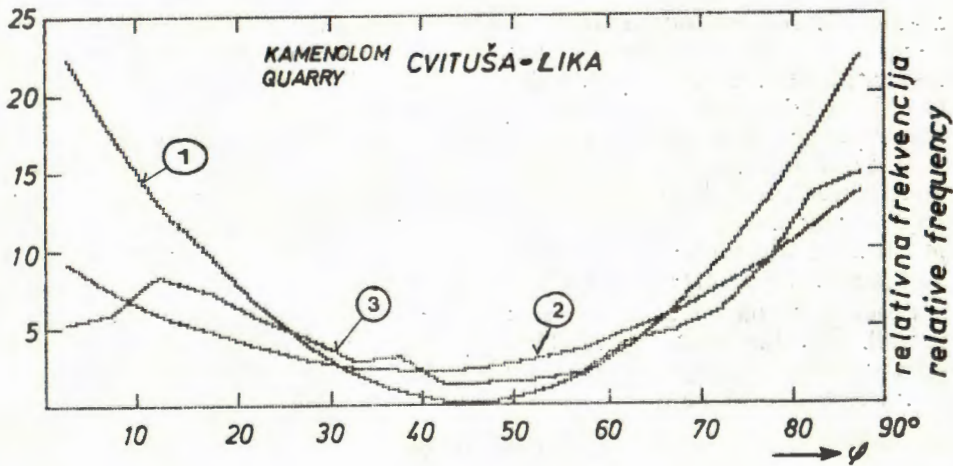
Testiranje je stoga izvršeno između reporne krivulje kvadratne parabole, kvadratnog polinoma i poligona frekvencija podataka.

Uspoređivanje je izvršeno pomoću kriterija za kvadratno i apsolutno odstupanje, kako je već prethodno najavljeno.

Sve matematičke operacije izvršene su pomoću elektroničkog personalnog računala Apple II e.



Sl. 11. Grafički prikaz analiziranih krivulja  
 Fig. 11. Graphical display of analysed curves

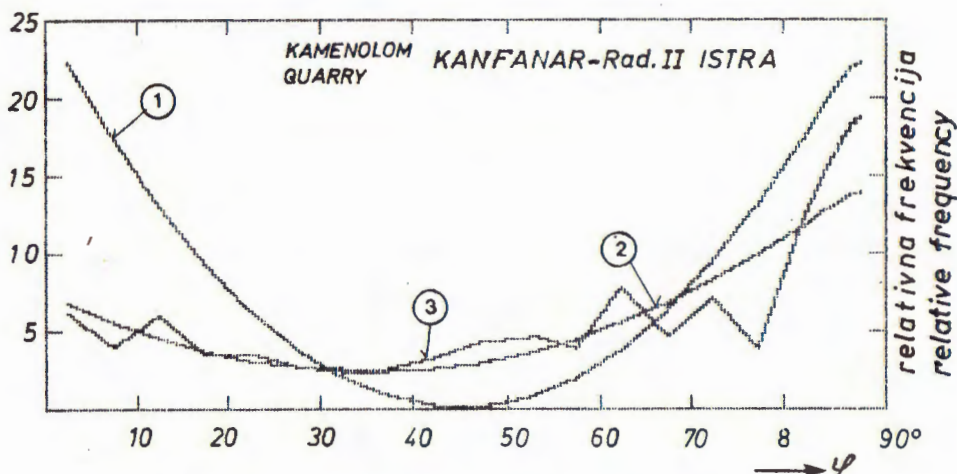


Sl. 12. Grafički prikaz analiziranih krivulja  
 Fig. 12. Graphical display of analysed curves

Primjeri rezultata proračuna i testova prikazani su na dijagramima slika 11, 12 i 13, gdje se na apscisi nalaze vrijednosti kuta  $\varphi$  (od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ ), a na ordinati relativne frekvencije ulaznih podataka.

Na svakoj slici vidljiva je i prepoznatljivija reporna krivulja (1) koja je uvijek ista. Krivulja (2) je aproksimirana parabola drugog stupnja, a krivulja (3) su podaci prikazani poligonom frekvencije.

Kao rezultat ovih operacija dobivena je tab. II na kojoj su skupno za pojedina ležišta prikazani rezultati dobiveni primjenom kriterija za kva-



Sl. 13. Grafički prikaz analiziranih krivulja  
 Fig. 13. Graphical display of analysed curves

dratno i apsolutno odstupanje, prema redosljedu u kojem ležište Kirmenjak zauzima prvo mjesto obzirom na povoljnost prostornog odnosa diskontinuiteta, zatim slijede ležišta Cvituša, Rozalit, Kanfanar radilišta II i III, a ležište Sivec Prilep (7) je posljednje. U istu je tablicu unešen redosljed procjene na osnovu histograma (iz tab. I). Odstupanja između ovih dviju analiza nisu posebno izražena, iznose pretežno jedno do dva mjesta (zadnja kolona u tab. II), s izuzetkom za ležište Crne Kričke, koje je pomaknuto za 4 mjesta. U svakom je slučaju, točnost procjena prostornog odnosa veća od analize odstupanja od reперne krivulje, nego kod prethodne analize pomoću histograma.

Posebno treba istaknuti da pored očekivanih odstupanja između pojedinih krivulja, postoje i razlike koje se pojavljuju između apsolutnog i kvadratnog odstupanja za pojedine krivulje pojedinačno, koje nisu potpuno proporcionalne.

#### ZAKLJUČAK

Izložena je metoda prostorne analize tektonskog sklopa koja u tvrdnje i objedinjuje njegove značajke važne za istraživanje, razradu i eksploataciju ležišta nekih nemetalnih mineralnih sirovina, posebice arhitektonsko-građevnog kamena.

Zbog niza specifičnosti u geološkoj građi i uvjeta u kojima se mineralna sirovina nalazi, potrebno je pored dosadašnjeg »klasičnog« obima istraživanja, posebnu pažnju posvetiti detaljnom istraživanju tektonskog sklopa.

Predložena i razrađena prostorna analiza tektonskog sklopa temelji se na jednostavnom matematičkom modelu prilagođenom osnovnim ulaznim geološkim podacima kutevima  $\alpha$  i  $\beta$  (pružanje i nagib diskontinuiteta). Postavljeni su kriteriji za povoljnost odnosno optimalnost

Tab. II Rezultati analize apsolutnog i kvadratnog odstupanja između pojedinih krivulja

Tab. II Results of analysis of absolute and square discrepancies among particular curves

Redosljed povoljnosti Order of favour- ableness	Kamenolom Quarry	Odstupanje podataka od reperne krivulje Data discrepancies from the standard curve		Odstupanje kvadratnog polinoma od reperne krivulje Discrepancy of square polynom from the standard curve		Redosljed povoljnosti kod histo- grama Order of favo- urableness by histograms	Razlika između obiju povolj- nosti Difference between both favourableness
		apsolutno abs.	kvadratno squ.	apsolutno abs.	kvadratno squ.		
1	Kirmenjask	62	503	58	378	3	2
2	Cvituša	63	559	70	507	4	2
3	Rozalit	76	531	69	493	1	2
4	Kanfanar — rad. II	87	736	79	654	2	2
5	Kanfanar — rad. III	89	724	80	651	5	0
6	Karneol	90	914	97	856	6	0
7	Lucija	101	986	100	913	8	1
8	Sivec P. polje 2	102	1091	108	1058	10	2
9	Punta	107	991	98	894	7	2
10	Sivec P. polje 5	116	1231	117	1213	11	1
11	Sivec P. polje 4	117	1238	117	1229	12	1
12	Barbakan	117	1273	112	1206	9	1
13	Sivec P. polje 1	121	1360	123	1342	14	1
14	Sivec P. polje 3	123	1351	122	1326	13	1
15	Crne Kričke	125	1302	90	768	19	4
16	Sivec P. polje 6	129	1461	128	1443	16	0
17	Sivec P. polje 8	130	1467	129	1461	15	2
18	Sivac B.	138	1636	136	1597	17	1
19	Sivec P. polje 7	140	1625	135	1590	18	1

prostornog odnosa diskontinuiteta obzirom na veličinu presjeka ( $\cos\varphi = 0$  ili ako teži prema 0, i  $\cos\varphi = 1$  ili ako teži prema 1).

Ova je analiza istakla izuzetno povoljne odnose diskontinuiteta u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena Rozalit, Kanfanar (radilišta II i III), Kirmenjak, Cvituša, Karneol i Punta.

Da bi se kriteriji za ocjenu rezultata analize poboljšali, pretpostavljena je idealna krivulja tektonskog sklopa, parabola drugog stupnja. Nakon toga izvršene su usporedbe podataka s polinomnom regresijom aproksimiranim krivuljama drugog stupnja, zatim s repnom krivuljom, pomoću apsolutnog i kvadratnog odstupanja. Ovako postavljeni kriteriji izbacili su u prvi plan prema povoljnosti prostornog odnosa diskontinuiteta ležišta Kirmenjak, Cvitušu, Rozalit, Kanfanar (radilišta II i III), te Karneol. Redoslijed je nešto izmijenjen od prvobitne konstatacije i u svakom slučaju točniji od procjene histograma na kojima su prikazane distribucije frekvencija kuteva  $\varphi$ .

Rezultati analiza i opažanja u pojedinim ležištima, te specifičan pristup u ovom radu u pogledu rješavanja problema tektonskog sklopa u fazi istraživanja navode na zaključak da se razrađena i testirana prostorna analiza tektonskog sklopa može korisno upotrijebiti za procjenu ležišta arhitektonsko-građevnog kamena. Stavljanjem u funkcionalnu vezu ove analize s rezultatima istražnog bušenja i definiranjem gustoće diskontinuiteta ove je procjene daljim studijama potrebno poboljšati.

Razrađena i testirana metoda omogućuje optimiranje prostornog odnosa diskontinuiteta.

Prikazane mogućnosti analize tektonskog sklopa na obrađenih 19 primjera ukazuju na razne stupnjeve međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta. Obrađena su ležišta arhitektonskog građevnog kamena karbonatnog sastava koja su s obzirom na genezu prvenstveno sedimentnog postanka. Izuzetak je ležište Sivec (Prilep) koje je metamorfnog postanka. Sva istraživanjem obuhvaćena ležišta međusobno se razlikuju i odlikuju nekim svojim specifičnim karakteristikama u geološkoj građi. To su prvenstveno nagib slojeva odnosno škriljavosti, nagib ostalih diskontinuiteta, debljina pojedinih slojeva, odnosno »paketa« kod metamornih stijena, čvrstoća stijena, uklopljenost eksploatabilnih dijelova stijenske mase u okolne stijene, tj. stijene podine i krovine, te karakter i veličina pojedinih tektonskih jedinica.

Istraživanje i mjerenje podataka u ležištima različitim po litološkom sastavu, starosti i stupnju tektonske poremećenosti, pokazalo je da između tektonskih sklopova postoje znatne razlike. Diskontinuiteti, prvenstveno slojne plohe kod većine ležišta imaju nagib od  $0^\circ$  do  $35^\circ$ , dok pukotine imaju nagib najčešće u rasponu od  $65^\circ$  do  $90^\circ$ .

Obzirom na upad diskontinuiteta, općenito unutar istraživanih i obrađenih primjera, mogla bi se izvršiti podjela ležišta u dvije grupe. Prvoj grupi pripadala bi ležišta s horizontalnom slojevitosti ili s vrlo blago nagnutim slojevima do  $10^\circ$ , kod kojih su pukotine pretežno vertikalne i dijelom subvertikalne (od  $80^\circ$  do  $90^\circ$ ). Drugoj grupi pripadala bi ležišta s povećanim nagibom slojeva od  $10^\circ$  do  $35^\circ$ , kod kojih je nagib ostalih diskontinuiteta (prvenstveno pukotina) u prosjeku znatno blaži te iznosi oko  $75^\circ$  (od  $65^\circ$  do  $90^\circ$ ).

Debljina slojeva, odnosno eksploabilnih dijelova stijenske mase varira od 0,5 m kod ležišta Cvituša u Lici do 33 m kod ležišta Punta, Barbakan i Sivac na Braču. U istarskim ležištima, koja su vrlo dobro uslojena, debljina iznosi oko 1 m (Kanfanar i Kirmenjak).

S obzirom na navedene različite karakteristike u geološkoj, građi, sva ova ležišta zahtijevaju opreznost u istraživanju i posvećivanju posebne pažnje pojedinim specifičnostima njihove građe.

Prilikom korištenja analize međusobnog prostornog odnosa između pojedinih sistema pukotina i pukotina općenito, za određeni dio tektonskog sklopa odnosno istražnog polja, potrebno je voditi računa o njezovoj veličini, kao osnovnoj jedinici za istraživanje i objedinjavanje određenog broja podataka. Na primjerima istraživanih ležišta može se ocijeniti, da je potrebno mjeriti diskontinuitete na što užem području, kako bi se izbjeglo miješanje podataka iz različitih tektonskih jedinica, a kojih u jednom ležištu može biti i nekoliko. Pod tektonskom jedinicom možemo smatrati dio stijenske mase nekog ležišta unutar kojeg nema većih promjena u pružanju i padu pojedinih sistema pukotina, slojevitosti odnosno diskontinuiteta općenito. Prema tome, ukoliko želimo dobiti što realniju sliku o prostornom odnosu diskontinuiteta unutar tektonskog sklopa, bolje je da opažanja i mjerenja obavljamo na manjoj površini.

Broj potrebnih podataka za jednu analizu prema tome najviše ovisi o veličini tektonske jedinice i njenoj raspucanosti. Može se ocijeniti da 50 do 100 podataka može u potpunosti zadovoljiti zahtjeve ovih analiza i pružiti zadovoljavajuće rezultate.

Broj mogućih presjeka kod prostorne analize iznosi  $n(n-1)/2$ , gdje »n« označava ukupni broj mjerenih diskontinuiteta. Tako na primjer ako imamo 50 diskontinuiteta ( $n = 50$ ), ukupni broj mogućih kombinacija međusobnih presjeka iznosi 1225. Ova brojka o mogućim presjecima istovremeno ukazuje da u jednoj tektonskoj jedinici možemo očekivati veoma velik broj blokova raznih veličina i oblika. Ukoliko dobiveni rezultati prikazani na histogramima pokažu da je vrijednost relativne frekvencije konstantna veličina, to znači da u toj tektonskoj jedinici možemo očekivati podjednaku zastupljenost svih kuteva između  $0^\circ$  i  $90^\circ$ , onda u toj analiziranoj tektonskoj jedinici možemo očekivati blokove svih mogućih oblika. Takvi tektonski sklopovi pokazuju raspucanost koja je podjednaka u svim smjerovima, odnosno u ovom slučaju dominira određena izotropnost u orijentaciji i položaju diskontinuiteta u prostoru.

Ako distribucije frekvencija imaju tendenciju povećanja prema  $90^\circ$  odnosno prema  $0^\circ$ , tada možemo konstatirati da će blokovi između diskontinuiteta biti veoma pravilni, a tektonski će sklop imati obilježje jake anizotropije, tj. biti će izuzetno povoljan sa stanovišta geoloških uvjeta ležišta arhitektonsko-građevnog kamena.

Glavni elementi optimalnosti stoga su kod prikazane analize sadržani u konstrukciji da kut presjeka  $\varphi$  između diskontinuiteta teži prema  $90^\circ$  odnosno prema  $0^\circ$ .

Konturni dijagrami polova normala na pukotine ostaju i dalje jedna od preliminarnih faza u istraživanju. Glavni elementi optimalnosti kod konturnih dijagrama sadržani su u postojanju tri maksimuma, uz uvjet

da kut između njih iznosi  $90^\circ$  ili približno toliko. Ovi elementi optimalnosti korišteni su i u ovom modelu, uz proširenje optimalnosti presjeka diskontinuiteta prema  $0^\circ$ .

Prikazana metoda prostorne analize tektonskog sklopa, prema izloženim rezultatima, trebala bi biti korištena prilikom istraživanja rascupanih stijenskih masiva u svrhu istraživanja, razrade i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Posebnu primjenu trebala bi naći u istraživanju ležišta arhitektonsko-građevnog i tehničkog kamena, gdje uz određivanje međusobnog prostornog odnosa diskontinuiteta mogu poslužiti i za određivanje oblika blokova i blokovitosti stijenske mase.

Praksa je pokazala da kod istraživanja i procjene arhitektonsko-građevnog kamena i vrednovanja starih i novih ležišta odlučujuću ulogu imaju četiri kriterija: umjetnički, tehnički, geološki (N. Bilbija, B. Crnković i A. Grimšičar, 1974, te I. Tomašić i B. Crnković, 1974), te još i tehnološko-ekonomski (B. Crnković i N. Bilbija, 1984).

Razrađena i testirana predložena metoda analize pripada osnovnim istraživanjima za ocjenu vrijednosti ležišta arhitektonsko-građevnog kamena, u sklopu geoloških uvjeta ležišta.

Detaljni geološko-rudarski istražni radovi koji su vezani na definiranje umjetničke i tehničke vrijednosti kamena, te geoloških uvjeta u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena sastoje se najčešće od:

- istražnog bušenja,
- izrade zasjeke, usjeka i kanala,
- probne eksploatacije.

Ovi istražni radovi prvenstveno su vezani za cjelovitost odnosno blokovitost stijenske mase u ležištu. Istražno bušenje kao jedna od nezaobilaznih metoda koristi se vrlo mnogo. Istražnim se bušenjem ne mogu postići isti efekti kod svih ležišta. Obzirom na diskontinuiranost stijenske mase, kod prvog tipa ležišta (nagib slojeva do  $10^\circ$ , a ostalih diskontinuiteta od  $80$  do  $90^\circ$ ) postižu se vrlo slabi rezultati, posebno ako se želi steći uvid u blokovitost stijenske mase. To prvenstveno vrijedi za vertikalno bušenje, zbog toga jer se ne uspijevaju presjeci i registrirati drugi diskontinuiteti osim slojevitosti. Da bi se i kod ovih ležišta postigli odgovarajući efekti, bilo bi potrebno sistematsko bušenje sistemom međusobno paralelnih, ali kosih bušotina. Ovako orijentirane bušotine presijecale bi slojevitost i ostale diskontinuitete, čime bi se dobio veliki broj podataka za obradu. Vertikalno bušenje u svakom je slučaju bolje primijenjivati kod drugog tipa ležišta, kad su svi diskontinuiteti pretežno u položaju da se mogu presijecati zbog dovoljnog nagiba. Potrebno je još spomenuti da kod ležišta arhitektonsko-građevnog kamena s većim brojem slojeva, koji su predvidivi za eksploataciju, treba slojne plohe uzimati u obzir za obradu kao vrlo važan element za analizu tektonskog sklopa, jer je prethodno rečeno da i slojevitost vodi određenoj optimalnosti ukoliko je u pitanju odgovarajuća debljina potrebna za dobivanje blokova.

Istražno bušenje u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena potrebno je izvoditi vrlo pažljivo. Postotak jezgre treba biti što bliži  $100\%$ . Ako je manji, tada je potrebno jasno definirati svaki nedostatak jezgre određenim obrazloženjem. Jezgru ne treba stavljati u sanduke već je



slagati na zemlju, bez skraćivanja, redosljedom koji odgovara položaju u stijenskoj masi. Opis jezgre, a posebno diskontinuiteta, važan je za dalje analize. Orijentirati jezgru moguće je u svim slučajevima kada u kamenu postoje određene strukturno teksturne karakteristike koje omogućuju orijentaciju jezgre prema stvarnom stanju u ležištu, naravno uz uvjet da bušenje nije izvedeno okomito na slojevitost ili škriljavost. Ovakvo izmjereni podaci mogu se također korisno upotrijebiti za dalje analize.

#### ZAHVALE

Na savjetima, diskusiji i pomoći u toku izrade ovog rada zahvaljujem se prof. dr B. Crnkoviću. Kolegama mr. H. Goldu i mr. A. Bariću zahvaljujem na suradnji prilikom obrade podataka na računalima. Posebno se zahvaljujem doc. dr M. Heinrich-Miletić na savjetima u završnoj fazi izrade rada.

Primljeno: 22. 12. 1986.

#### LITERATURA

- Bilbija, N., Crnković, B. i Grimšičar, A. (1974): Perspektivna područja za eksploataciju arhitektonsko-građevnog kamena u SFRJ. *Simpozij: Ukrasni i tehnički kamen, Zbornik radova*, 1—16, Beograd.
- Bonyun, D. and Stevens, G. (1971): A General Purpose Computer Program to Produce Geological Stereo Net Diagrams. *Data Processing in Biology and Geology*, 165—188, Academic Press, London—New York.
- Crnković, B. (1966): Ocjena homogenosti stijenske mase. *Građevinar*, 18/4, 155—162, Zagreb.
- Crnković, B. i Bilbija, N. (1984): Vrednovanje arhitektonsko-građevnog kamena. *Geol. vjesnik*, 37, 81—95, Zagreb.
- Davis, J. C. (1973): *Statistics and Data Analysis in Geology: Least-Squares Methods and Regression Analysis*. John Wiley and Sons, inc., p. 550, New York—London—Sydney—Toronto.
- Dimitrijević, M. (1978): Geološko kartiranje. ICS, 486, Beograd.
- Hudson, J. A. and Priest, S. D. (1979): Discontinuities and Rock Mass Geometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16, 339—362. Pergamon Press, Oxford—New York—Paris—Frankfurt.
- Lokin, P. (1978): Heterogenost i anizotropija ispucalosti čvrstih stenskih masa. Doktorska disertacija, 204 str., Univerzitet u Beogradu.
- Patton, F. D. and Deere, D. U. (1971): Geological Factors Controlling Slope Stability in Open Pit Mines: Stability in Open Pit Mining (*Proceeding of the First International Conference on Stability in Open Pit Mining, Vancouver*), 23—47, New York.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A. (1976): Discontinuity Spacings in Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13, 135—148, Pergamon Press, Oxford—New York—Paris—Frankfurt.
- Priest, S. D. and Samaniego, A. (1983): A Model for the Analysis of Discontinuity Characteristics in Two Dimensions. *International Congress on Rock Mechanics*, 199—207, Melbourne.
- Tomašić, I. i Crnković, B. (1974): Osvrt na postojeći Propis o klasifikaciji i kategorizaciji rezervi ukrasnog kamena i vođenju evidencije o njima. *Simpozij: Ukrasni i tehnički kamen, Zbornik radova*, 17—25, Beograd.
- Tomašić, I. (1981): Prostorna analiza tektonskog sklopa ležišta arhitektonsko-građevnog kamena. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 28/4, 395—405, Ljubljana.
- Tomašić, I. (1982): Iskoristivost ležišta arhitektonsko-građevnog kamena u ovisnosti od tektonskog sklopa i tehnologije eksploatacije. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 29/4, 333—342, Ljubljana.

- Vesel, J. (1979): Stanje raziskanosti in možnost ekonomske eksploatacije nahajališč naravnega okrasnega kamna v Sloveniji. II savjetovanje o nemetalnim mineralnim sirovinama u SFRJ, Zbornik radova: 243—253, Opatija.
- Vesel, J. i Lavrenčić, J. (1985): Izračun stopnje izplena blokova v nahajališču arhitektonsko-gradbenoga kamna na osnovi računalniške obdelave nastopnja diskontinuitetnih ploskev. Zbornik radova: Svjetski kongres o nemetalnim mineralnim sirovinama, knj. 1, 257—271, Beograd.
- Warburton, P. M. (1983): Applications of a New Computer Model for Reconstructing Blocky Rock Geometry-Analysing Single Block Stability and Identifying Keystones. International Congress on Rock Mechanics, 225—230, Melbourne.

## Spatial Analysis of Tectonic Fabric Characteristics by means of Microcomputer

I. Tomašić

Rocks mass discontinuity is one of the basic tectonic fabric characteristics. As consequence of different stress directions and strains in the rock mass former tectonic fabric is a subject of change. Fabric consists of different elements which are mutually connected by morphological, spatial, functional and genetic characteristics. This is a sum of all elements in geological structure of the deposit which may be shown by geometry. In order to improve exploration works and determine their extension it is necessary as preliminary investigation to gather tectonic fabric elements.

Planar discontinuity or disruptions in rock masses, bedding and fissures characterize rock masses genetically and under stress conditions. Tectonic fabric influences engineering building activity and hydrotechnical works and mineral-raw material exploitation by surface and underground mining.

The article presents study of mentioned planar elements in space, with subsequent determination of isotropy or anisotropy degrees. Quantitative evolution of rocks disruption degree, with mutual relationship of planar discontinuities, primarily fissures, for each particular case and group of fissure families, approximately parallel, genetically related, have been done.

Elaborated analysis of tectonic fabric which determines its characteristics, important for non-metal mineral deposits, is especially convenient for dimension stone quarries.

The investigation is based upon observations and great number of discontinuity measurements in dimension stone deposits: Kirmenjak, Kanfanar and Lucija in Istria; Rozalit, Crne Kričke, Karneol and Cvituša in Dalmatinska Zagora and Lika; Punta, Barbakan and Sivac on the Brač island and Sivec by Prilep in Macedonia.

Although all of them belong to carbonate terraines, their mutual diversities in tectonic fabric and structure facilitated testing of proposed spatial fabric analytical method.

The presented and elaborated spatial tectonic fabric analysis is based upon a simple mathematical model accommodated for basic input of geological data, i.e. angles  $\alpha$  and  $\beta$  (dip and strike of discontinuity). Favourableness criterion, i.e. optimum of spatial discontinuity relationship, regarding size of crosssection ( $\cos\varphi = 0$  od tends to be 0, and  $\cos\varphi = 1$  or tends to be 1), have been established.

The analysis points out exceptionally convenient discontinuity relationships in Rozalit, Kanfanar (mining area II and III), Cvituša and Kirmenjak dimension stone quarries.

In order to improve criterion for evaluation of analytical results, a standard tectonic fabric curve was constructed, i.e. square parabola.

It was followed by comparison of data and an approximation curve of the second degree by means of polynomial regression, proceeded by a standard curve and by means of absolute and squared discrepancies. The established criteria pointed out Kirmenjak, Cvituša, Rozalit, Kanfanar (mining area II and III) and

Karneol quarries as samples of particularly convenient spatial tectonic fabric relationship. The order in comparison to the original statement has been slightly changed and judgement precision of the histogram, displaying distribution of frequency angles  $\varphi$  improved.

The analytical results and observations in particular deposits, as well as specific approach to spatial tectonic fabric analysis (described in this paper) in exploration stage may be utilized for evaluation of dimension stone deposits. Exploration drillings and determination of discontinuity density, functionally related to the foregoing analysis should be improved by further studies.

On the basis of presented material, it may be stated that concurrently with »classical« methods, special attention should be paid to tectonic fabric analysis in order to describe geological situation more realistically.