

Modificirana prostorna analiza tektonskog sklopa u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena primjenom računala

Ivan TOMASIĆ

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

Jedna od važnijih geoloških karakteristika tektonskog sklopa je raspucanost stijenske mase u obliku pukotinskih sistema. Izvršeno je poboljšanje analize međusobnog prostornog odnosa pukotinskih sistema u tektonskom sklopu. Ovo je daljnji pokušaj da se analizira distribucija spomenutih elemenata u prostoru i utvrdi stupanj njihove izotropije odnosno anizotropije u stijenskoj masi. Temelji se na jednostavnom matematičkom modelu tektonskog sklopa koji je poboljšán i programiran za elektroničko računalo. Modificirana prostorna analiza tektonskog sklopa realizirana je i testirana na većem broju terenskih podataka, prilikom čega je pokazala zadovoljavajuće rezultate.

The tectonic fabric characteristics is an important geological feature in which the characteristics of discontinuity systems are visible. Computer analysis of the joint sets relations among the fabrics has been improved. It is also an attempt to determine the degree of isotropy, i. e. anisotropy of the same, in rock masses, by the distribution of the mentioned elements in space. It is based on a simple mathematical model of the fabric and has been elaborated and programed for a computer. Modified spatial analysis of tectonic fabric characteristics has been realised and tested in this respect on a large number of field data, and has proved to be satisfactory.

Procjena blokovitosti stijenske mase u ležištima arhitektonsko-građevnog i tehničkog kamena zahtijeva detaljno istraživanje tektonskog sklopa. U tom se pogledu razvijaju razne metode istraživanja i analize temeljene na opažanju i mjerenju diskontinuiteta u stijenskoj masi. Jedan od ciljeva spomenutih metoda je definiranje međusobnog prostornog odnosa i gustoće diskontinuiteta u dijelu istraživanog prostora, kao osnovne jedinice za istraživanje i objedinjavanje u analizi određenog broja podataka.

Svrha je ovih metoda razvoj i definiranje kriterija za vrednovanje stijenskih masa, posebice kod raznih rudarskih i geotehničkih radova.

Modificirana prostorna analiza, kao dio metodologije istraživanja tektonskog sklopa, zasniva se na već prethodno razvijenom jednostavnom matematičkom modelu koji rješava međusobni prostorni odnos diskontinuiteta u granicama od 0° do 90°. Formalni model (I. Tomasić, 1987) može se prikazati pomoću relacije:

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

Promatrajući tektonski sklop kao složeni geološki sustav, pri njegovu modeliranju istraživanja su usmjerena na utvrđivanje mjere φ , odnosa između diskontinuiteta, prema uhodanim i tradicionalno mjerljivim geološkim podacima na terenu, kutevima α i β (kut azimuta i kut nagiba). Ovi su kutevi izolirani kao značajni objekti tektonskog sklopa s obzirom na njihovu postojeću bogatu bazu, koja također omogućuje efikasno testiranje modela.

Funkcija preslikavanja X predstavlja analitički opis zavisnosti predložene mjere φ (odnosa između diskontinuiteta) i kuteva α i β . Premda je u odnosu na parametre koji utječu na određivanje kuta φ , predloženi model kvalitativno jednostavno građen, njegovo testiranje na primjeru iz baze kuteva α i β pokazalo je značajno poklapanje sa stvarnim stanjem.

S obzirom na udio velikog broja numeričkih podataka cijeli je postupak realiziran na digitalnom računalu.

Kut između dviju ravnina, a u ovom slučaju diskontinuiteta, određuje se prema izrazu:

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

gdje su:

$\varphi_{i,j}$ kut između i -tog i j -tog diskontinuiteta, a koeficijenti smjera normale na ravninu iznose:

$$A_i = \sin \alpha_i \operatorname{tg} \beta_i$$

$$B_i = \operatorname{tg} \beta_i \cos \alpha_i$$

$$C_i = 1$$

Uvrštenje ovih vrijednosti u prethodni izraz predstavlja osnovu matematičkog modela tektonskog sklopa, koji je korišten kao podloga za kreiranje algoritma u programu za elektroničko računalo.

Istovremeno ovaj je algoritam temeljni, kako za prostornu analizu tektonskog sklopa, tako i za modificiranu prostornu analizu tektonskog sklopa, koja će biti predmetom izučavanja u ovom radu.

Istraživanja se temelje na opažanjima i mjerenju obilja podataka o diskontinuitetima u ležištima arhitektonsko-građevnog kamena karbonatnog sastava: Sivec kraj Prilepa, te Punta, Barbakan i Sivac na Braču.

Prethodno, skraćeno izložena metoda analize tektonskog sklopa koristi se za analizu podataka koji ne podliježu nekom posebnom kriteriju selekcije. Istovremeno se u analizi koriste svi podaci o diskontinuitetima kao jednom od važnih obilježja tektonskog sklopa. To su kutevi α_i i β_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) koji čine »par« odnosno uzorak za razmatranje u definiranju orijentaciju diskontinuiteta u prostoru.

Međutim, poznato je da u ležištima odnosno stijenskim masama najčešće postoje sistemi-skupovi paralelnih i približno paralelnih pukotina, tj. familija pukotina istog ili sličnog genetskog porijekla, a koje pripadaju različitim fazama strukturnog preoblikovanja ranijih primarnih sklopova.

Stoga je u ovoj fazi istraživanja bilo potrebno svaki podatak selektirati u pripadajući sistem pukotina. To je predstavljalo osnovu za razvoj i poboljšanje programa *Tekto-1* (I. Tomašić, 1987). Kreirana je

nova, modificirana verzija programa *Tekto-1* pod imenom *Tekto-2*. Povezivanje s programom *Tekto-1* bilo je moguće jer se ovaj odlikuje modularnošću. Isto tako ispunjen je zahtjev za što boljom fleksibilnošću obrade i mogućnošću korištenja programskog paketa prilikom geoloških istraživanja na terenu. Korištenje programa je olakšano primjenom »menu« tehnike. Pod tim se podrazumijeva pristup pojedinim fazama izvođenju programa, a da pri tome nije potrebno znati principe programiranja.

Program *Tekto-2* ne razlikuje se mnogo od prethodnog programa *Tekto-1*. Razlika je u tome što je na početku potrebno izvršiti selekciju diskontinuiteta po pojedinim sistemima, što se izvodi interaktivno preko terminala. Program dalje proračunava kut prostornog odnosa φ između pojedinih sistema diskontinuiteta, odnosno skupina pukotina. Rezultat obrade podataka prikazuje se pomoću histograma ili poligona relativnih frekvencija koje se nalaze na ordinati. Na apscisi se nalaze vrijednosti kuteva u intervalu od 0° do 90° u razmacima od po 5° .

Prema tome, za modificiranu prostornu analizu tektonskog sklopa koriste se isti ulazni podaci kutevi α i β , koji su prethodno selekcionirani po pojedinim sistemima pukotina, a nakon toga se postupak provodi kao i u prije opisanoj prostornoj analizi.

Na terminalskoj jedinici ispisuju se moguće akcije računala od kojih korisnik bira onu koju želi. Na primjer:

- učitavanje i kontrolni ispis podataka,
- proračun prostornog odnosa diskontinuiteta,
- selekcija diskontinuiteta po sistemima,
- proračun prostornog odnosa između pojedinih sistema diskontinuiteta,
- klasifikacija prostornih odnosa diskontinuiteta po razredima,
- iscrtavanje histograma i poligona frekvencija.

Rezultati modificirane prostorne analize tektonskog sklopa prikazani su pomoću poligona frekvencija koji daju prostorni odnos između pojedinih sistema pukotina kako je to prikazano na slikama 1, 2 i 3.

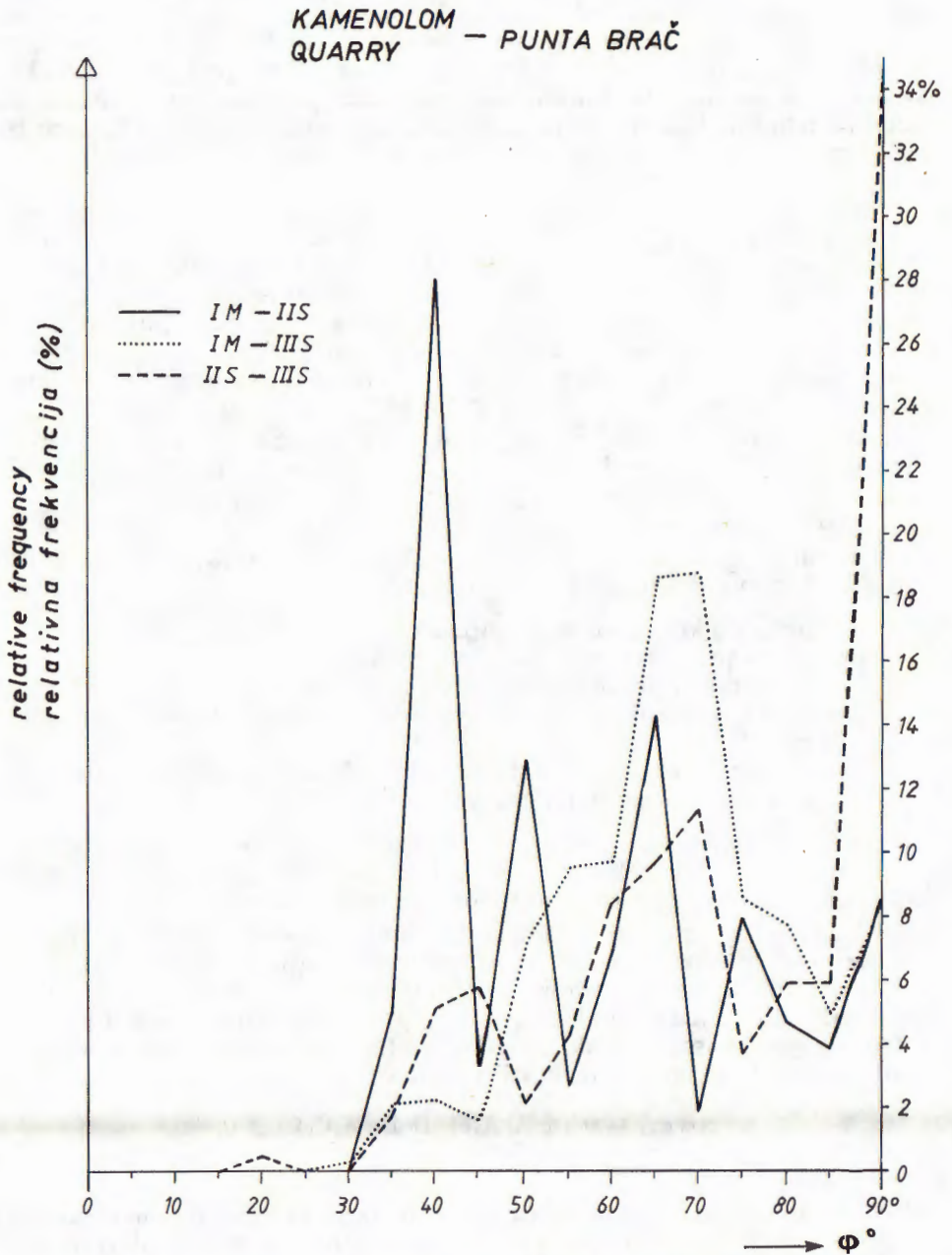
S obzirom da je u proračunu selekcijom izvršena eliminacija pukotina koje su međusobno paralelne odnosno zastupljene unutar jednog te istog sistema, na prikazanim je dijagramima izražen trend grupiranja dobivenih vrijednosti više ili manje prema 90° . Za ovu vrstu analize vrijedi stoga optimalnost da pojedini sistemi pukotina budu međusobno okomiti i da razmak između njih bude što veći:

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

odnosno da $1 \rightarrow \max$.

Ovi uvjeti za optimalni međusobni položaj vrijede prvenstveno za odnose između diskontinuiteta kod ležišta arhitektonsko-građevnog kamena, jer njihov položaj diktira oblik i veličinu blokova koji bi se mogli eksploatirati.

Na slici 1 prikazani su rezultati analize skupine od 81 podatka, koji su izmjereni u kamenolomu Punta na Braču. To je ležište arhitektonsko-građevnog kamena senonske starosti u kojem dominira eksploata-



Sl.1. Poligoni distribucije frekvencija kuteva Φ između pojedinih sistema pukotina

Fig.1. Polygonal distributions of angles φ between of joint sets

bilni sloj bjeličastih vapnenaca debljine oko 30 m bez slojnica, tj. dijagenetskih diskontinuiteta. Zbog toga je slojevitost kao element u analizi zanemarena. Grupirani u tri sistema i označeni kao I M, II S i III S, ovi podaci (tabla I), daju 700, 850 i 238 međusobnih presjeka s odgovarajućim učešćem od 39,1; 47,5 i 13,4% i srednjom vrijednosti φ od 55,1°; 64,4° i 69,7°. Na slici se jasno uočava da do 30° nema vidljivih presjeka što je u stvari povoljno. Nakon toga prostorni odnos s učešćem od 28% u području 35° do 45° kviri odnos između maksimuma I M i submaksimuma II S. Ipak grupiranje ostalih presjeka u području prema 90°, te prilično velike srednje vrijednosti kuta φ ukazuju na relativno povoljan prostorni odnos diskontinuiteta u ležištu.

Drugi primjer analize 129 podataka kuteva α i β na slici 2 odnosi se na ležište arhitektonsko-građevnog kamena Barbakan. Ono je također senonske starosti a nalazi se istočno od ležišta Punta na Braču. Rezultati prikazane modificirane analize pomoću poligona distribucije frekvencije kuteva φ ukazuju na vrlo nepovoljan položaj presjeka pukotina između maksimuma I M i submaksimuma III S u području između 20 i 30°. U ovom se ležištu može očekivati nešto veći udio nepravilnih blokova izduženog oblika. Ostali presjeci uglavnom su povoljnih značajki, jer njihove veličine teže prema 90°.

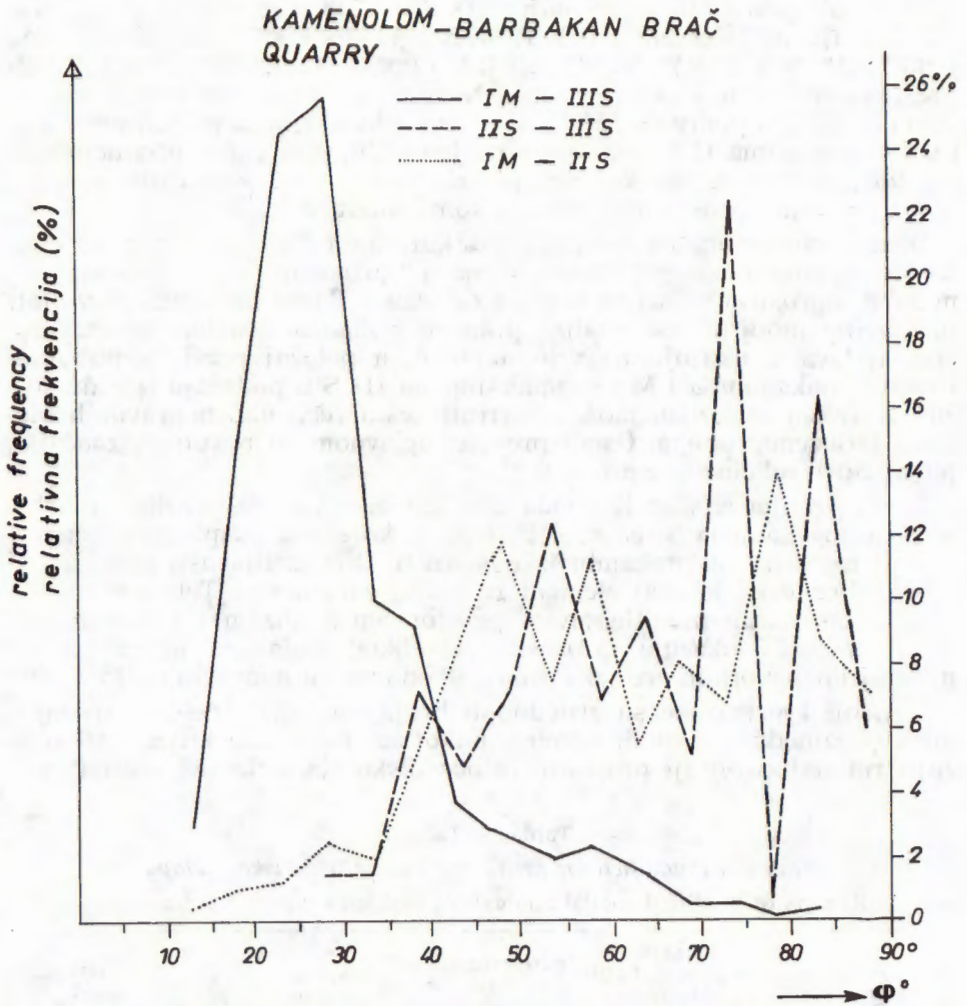
Treći primjer analize 129 podataka odnosi se na ležište arhitektonsko-građevnog kamena Sivec kraj Prilepa, u kojem se eksploatira masivni dolomitni mramor prekambrijske starosti. Duž škriljavosti nema odvajanja zbog čega je ovaj element u analizi zanemaren. Tektonski sklop ležišta analiziran modificiranom prostornom analizom i prikazan grafički na slici 3 ukazuje na učestalost velikog broja sistema pukotina i njihovih nepovoljnih presjeka prema 0° odnosno u području od 15 do 40°.

U tabli I prikazane su vrijednosti broja presjeka, učešća i srednjeg kuta φ između pojedinih sistema pukotina. Prikazane vrijednosti ukazuju na najpovoljniji prostorni odnos diskontinuiteta u ležištu Punta.

Tabla — Table I.

Rezultati modificirane prostorne analize tektonskog sklopa
Results of modified spatial analysis of tectonics fabric characteristics

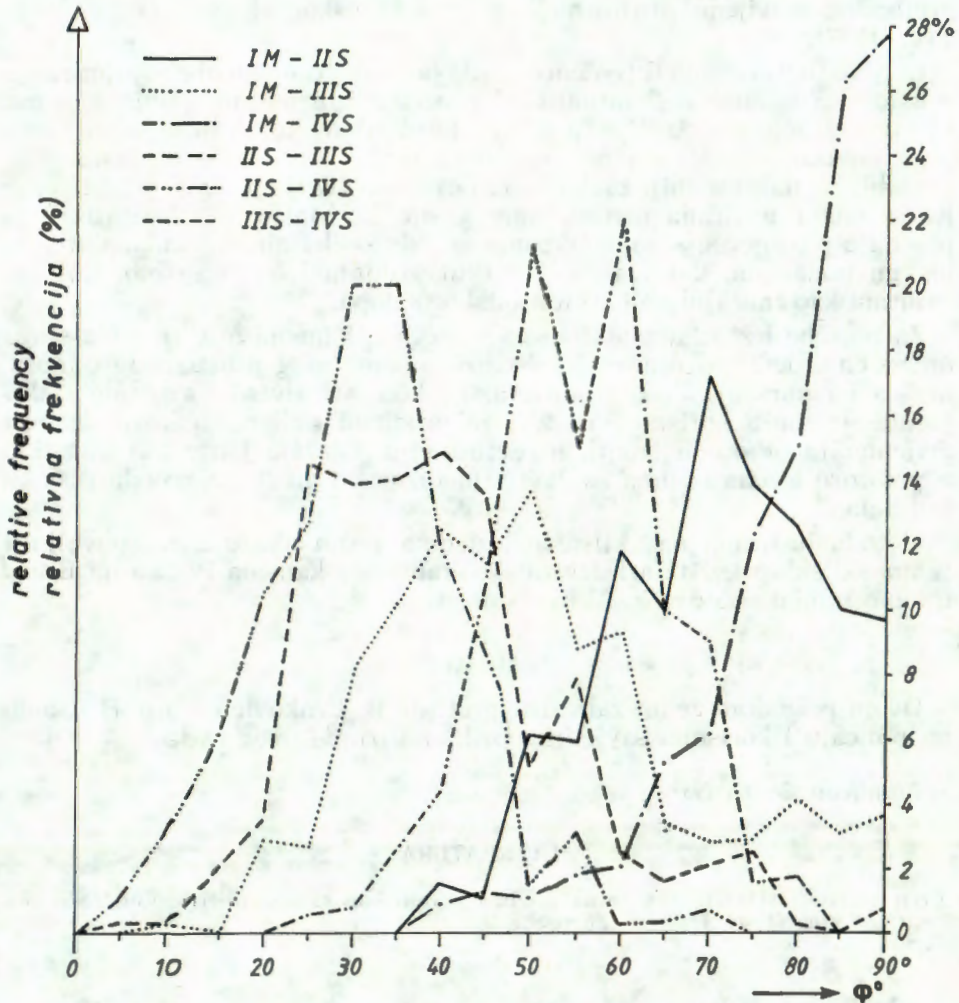
Kamenolom Quarry	Maksimum Submaksimum Maximum Submaximum	Broj presjeka Number of cross-sections	% presjeka % cross- sections	φ_{sr} φ_{mean}	$\cos \varphi_{sr}$ $\cos \varphi_{mean}$
Punta — Brač	I M — II S	700	39,1	55,1°	0,57
	I M — III S	850	47,5	64,4°	0,43
	II S — III S	238	13,4	69,7°	0,35
Barbakan — Brač	I M — II S	1564	41,8	61,4°	0,48
	I M — III S	1840	49,1	29,2°	0,87
	II S — III S	340	9,1	63,3°	0,45
Sivec — Prilep	I M — II S	1643	27,7	68,4°	0,37
	I M — III S	1060	17,9	47,9°	0,67
	I M — IV S	1325	22,4	77,7°	0,21
	II S — III S	620	10,5	36,8°	0,80
	II S — IV S	775	13,1	29,0°	0,87
	III S — IV S	500	8,4	53,1°	0,60



Sl.2. Poligoni distribucije kuteva Φ između pojedinih sistema pukotina

Fig.2. Polygonal distributions of angles φ between of joint sets

KAMENOLOM
QUARRY — SIVEC PRILEP



Sl. 3. Poligoni distribucija frekvencija kuteva φ između pojedinih sistema pukotina

Fig 3. Polygonal distribution of angles φ between of joint sets

ZAKLJUČAK

Razrađena je, testirana i prikazana metoda modificirane prostorne analize tektonskog sklopa. Njena je svrha da rješava međusobni prostorni odnos između pojedinih sistema pukotina, zanemarujući pritom prostorni odnos pojedinih približno paralelnih pukotina unutar jedne familije odnosno sistema. Metoda se nadograđuje na već postojeću i prethodno razvijenu prostornu analizu tektonskog sklopa (I. Tomašić, 1987).

U toku istraživanja utvrđeno je da metoda omogućuje optimiranje prostornog odnosa diskontinuiteta posebice između pojedinih sistema i to u području prema 90° . To je prostorni odnos kod kojeg je anizotropija najveća, a u ležištu postoje uvjeti kada se mogu eksploatacijom pridobivati najpravilniji blokovi uz povećane koeficijente iskoristivosti. Razrađena i testirana metoda omogućuje kvalitativno i kvantitativno praćenje postojećeg stanja tektonskog sklopa definiranog ulaznim geološkim podacima, kutevima α i β (kut azimuta i kut nagiba), koji su izolirani kao značajni objekti tektonskog sklopa.

Za potrebe ležišta arhitektonsko-građevnog kamena ova metoda stoga omogućuje detaljno praćenje i analizu međusobnog prostornog odnosa, učesća i raspršenja diskontinuiteta. To kod istraživanja, razrade i eksploatacije može korisno poslužiti za procjenu oblika blokova, izbor i orijentaciju otkopnih fronti, te definiranje položaja istražnih bušotina u prostoru ležišta kojima se utvrđuju razmak i gustoća između diskontinuiteta.

Metoda testirana na aktivnim ležištima jasno ukazuje na povoljniji tektonski sklop ležišta arhitektonsko-građevnog kamena Punta na Braču u odnosu na druga dva analizirana primjera.

ZAHVALE

Ovom prigodom želim zahvaliti prof. dr B. Crnkoviću i mr H. Goldu na poticaju i korisnim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Primljeno: 28. 12. 1987.

LITERATURA

Tomašić, I. (1987): Prostorna analiza tektonskog sklopa primjenom računala. *Geol. vjesnik*, 40, 379—405, Zagreb.

Modified Spatial Analysis of Tectonic Fabric Characteristics in Dimension Stone Deposits by means of Computer

I. Tomašić

Planar discontinuities are one of the basic tectonic fabric characteristics which are mutually connected by morphological, spatial, functional and genetic relationships. In order to improve exploration works and to determine their extension it is necessary to gather tectonic fabric elements as preliminary investigation.

Modified spatial analysis of tectonic fabric characteristics has been realised, tested and presented in this article. It is based on the simple mathematical model of the tectonic fabric (I. Tomašić, 1987) which has been modified, improved and programed for a computer.

The model is accomodated for basic input of geological data, i. e. angles α and β (dip and strike of discontinuity). Favourableness criterion, i. e. optimum of spatial discontinuity relationship, especially cross-section of angles φ which tends to be 90° ($\cos \varphi = 0$ or tends to be 0), has been established.

The investigations is based upon observations and large number of discontinuity measurements in dimension carbonate stone deposits: Punta and Barbakan on the Brač island and Sivec by Prilep.

This method of analysis of planar discontinuity sets enables better assesment of their mutual spatial relationship, participation and dispersion. The mentioned favourableness are visible from diagrams where the polygonal distribution of angle φ between joint sets have been presented. The analysis points out exceptionally convenient discontinuity relationships in Punta dimension stone quarry. The method may be useful for exploration and evaluation of dimension stone deposits, especially refering to influence on block form, and particularly in determination of the height and position of excavation fronts (faces) and determination of exploitation directions regarding the spacial arrangement of rock masses.

Exploration drillings and determination of discontinuity density, functionally related to the foregoing analysis should be improve by further studies.