

## UNAPREĐENJE ODREĐIVANJA PROSJEČNOG PROFILA JAMSKE PROSTORIJE

Vladimir RENDULIĆ

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

**Ključne riječi:** Vjetrenje rudnika, Podzemne prostorije, Površina poprečnog presjeka, Prijenosna naprava, Osvjetljavanje poprečnog presjeka, Vjetreni otpor

Određivanje otpora vjetrenoj struji u jamskoj prostoriji s dozvoljenom pogreškom mnogo ovisi od poznavanja točnih vrijednosti njezinih geometrijskih karakteristika: duljine, poprečnog presjeka i opsega. Eventualna pogreška kod određivanja profila prostorije povećava se kod proračunavanja otpora s trećom potencijom.

Prikazana je konstrukcija prijenosne naprave za osvjetljavanje poprečnog profila prostorije kod fotografiranja. Određivanje geometrijskih karakteristika prosječnog profila dionice prostorije prikazano je analitički i grafički korišćenjem odnosa  $F^3/U$  mjerenih profila.

**Key-words:** Mine ventilation, Underground openings, Cross-sectional area, Portable device, Illumination of the cross-section, Ventilation resistance

Determination of air current resistance in a mine opening with allowable error depends very much on knowing the exact values of its geometric characteristics, i. e. length, cross-section, and perimeter. Eventual error in determining an opening profile grows when calculating the resistance by raising to the third power.

The paper describes the construction of a portable device for illumination of cross-sectional area for taking photographs. Determination of geometric characteristics of an average stage profile of a mine opening is analytically and graphically presented here-with by application of  $F^3/U$  relation of measured profiles.

### Uvod

Ukupna sila otpora strujanju zraka u rudarskoj prostoriji zavisi o duljini prostorije, površini i opsegu poprečnog presjeka, zatim o hrapavosti stijenki, naglom suženju i proširenju te preprekama na vjetrenom putu, krivinama, križištima i sl.

Ukupni otpor prolazu vjetrene struje dobiva se zbrajanjem pojedinih linijskih i dodatnih otpora vjetrenih provodnika rudnika.

Uslijed viskoznosti zraka u protoci se javljaju tangencijalna naprezanja i odgovarajuće aerodinamičke sile trenja koje nastoje spriječiti strujanje. Kod podgrađenih jamskih prostorija podgrada uzrokuje osnovni otpor stvaranjem slobodnih struja i zastoynih zona ispunjenih masama zraka u vrtložnom kretanju. Ovisno o razmaku podgrade, veći je ili manji volumen zastojne zone odnosno gubitak energije. Kod nepodgrađenih jamskih prostorija osnovni otpor stvara nejednolika hrapavost krovnihi i bočnih stijenki te poda prostorije. Ovdje se stvara turbulencija neposredno na izbočinama hrapavosti, koje usporavaju strujanje, oblikuju različite profile brzina i utječu na veličinu gubitka energije.

Gubitak energije na linijske otvore između dva presjeka jamske prostorije može se odrediti iz poznate formule Darcy-Weissbacha za gubitak tlaka u cijevima, koja preuređena za jamske uvjete dobiva oblik:

$$h = \frac{\lambda \varrho}{8} \frac{LU}{F^3} Q^2, \text{ Pa} \quad (1)$$

gdje su:

$h$  – gubitak tlaka (depresija) uslijed trenja, kod strujanja zraka u jamskoj prostoriji, Pa;  
 $\lambda$  – koeficijent hidrauličkog trenja;

$\varrho$  – srednja gustoća zraka u jamskoj prostoriji,  $\text{kg/m}^3$ ;

$L$  – duljina jamske prostorije, m;

$F$  – površina svijetlog poprečnog presjeka prostorije,  $\text{m}^2$ ;

$U$  – opseg poprečnog presjeka jamske prostorije, m;

$Q$  – protočna količina zraka,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$v$  – brzina strujanja zraka u prostoriji, m/s;

$D$  – hidraulički promjer, m.

Jednadžba odgovara za proračun depresije kod turbulentnog strujanja zraka u ravnoj dionici jamske prostorije, konstantnog presjeka i hrapavosti, te kod konstantne gustoće zraka. U praksi, kod malih visinskih razlika, računa se s prosječnim vrijednostima gustoće u vidu aritmetičke sredine gustoća zraka u točkama 1 i 2, prema formuli:

$$\varrho = (\varrho_1 + \varrho_2)/2, \text{ kg/m}^3, \quad (2)$$

gdje su:

$\varrho_1$  i  $\varrho_2$  – gustoće zraka na početku i kraju dionice jamske prostorije,  $\text{kg/m}^3$ .

Kod vjetrenja u rudnicima otpor predstavlja koeficijent proporcionalnosti u funkcijskoj zavisnosti između depresije ( $h$ ) i protočne količine zraka ( $U$  šakov et al., 1978). Ispitivanja su pokazala da ova zavisnost ima parabolični karakter i da se općenito može prikazati jednadžbom:

$$h = RQ^n, \text{ Pa} \quad (3)$$

gdje su:

$R$  – otpor dionice kod  $n=2$ ,  $\text{kg/m}^7$ ;

$n$  – eksponent, čija veličina zavisi od režima strujanja: kod turbulentnog strujanja  $n=2$ , a kod laminarnog  $n=1$ ;

Kod proračunavanja depresije jamskih prostorija računa se obično s konstantnom veličinom otpora



(R) i uzima se eksponent  $n = 2$ , što unosi u proračun izvjesnu rezervu (Skotschinski et al., 1956; Teply, 1990). Specifični otpor izražen na 100 m duljine jamske prostorije, glasi:

$$R_{100} = 12,5 \lambda \rho U/F^3, \text{ kg/m}^7 \quad (4)$$

Vidljivo je da veličina otpora ( $R_{100}$ ) nije konstantna veličina, jer je linearno proporcionalna promjenljivom koeficijentu hidrauličkog trenja ( $\lambda$ ) koji je zavisao od Reynoldsovog broja ( $Re$ ) i relativne hrapavosti ( $k/D$ ). Vjetreni otpor prostorije ovisi također i od geometrijskih dimenzija profila, koje su u formuli karakterizirane odnosom  $U/F^3$ . Prema tomu, prostorije mogu posjedovati isti koeficijent trenja, a da im je veličina otpora različita. Veća površina poprečnog presjeka ( $F$ ) jamske prostorije djeluje u smislu smanjenja otpora (Vučić, 1970). Smanjenje otpora provodnika kod povećanja površine poprečnog presjeka nastaje i uslijed smanjenja koeficijenta hidrauličkog trenja ( $\lambda$ ) uzrokovanog smanjenjem veličine relativne hrapavosti ( $k/D$ ) povećanog plašta prostorije (Neumann et al., 1963).

Odnos  $U/F^3$  za prostorije bez podgrade ovisi uglavnom od kvalitete njezine izrade. Općenito su poprečni presjeci jamskih prostorija nepravilnog oblika i promjenljivi po duljini, osim u slučaju preciznih permanizacija.

Pogreška od 10% kod mjerenja profila prostorije uzrokuje pogrešku površine od 33% te kao takva umanjuje ili povećava proračunati otpor vjetrenog provodnika. Kod nepodgrađenih prostorija u rudnicima raspon varijacije površine profila iznosi obično preko 3, pa je za određivanje prosječnog profila u dionici, s dozvoljenom pogreškom, potrebno mnogo vremena.

### Mjerenje poprečnog presjeka u rudničkim podzemnim prostorijama

U jamskoj praksi razvio se do danas niz specijalnih metoda i naprava za mjerenje površine poprečnih presjeka vjetrenih provodnika, s različitom točnošću. Mjerenje površine profila klasičnim načinom, uz pomoć mjerne vrpce, ima nedostatke kod primjene u prostorijama nepravilnog oblika poprečnog presjeka, kao što su: nepodgrađene prostorije, podgrađene prostorije pod djelovanjem gorskog tlaka te zauzete i slabo održavane prostorije.

Metode mjerenja nepravilnih profila osnivaju se uglavnom na određivanju polarnih koordinata, pantografiranju ili fotografiranju. Jednostavne naprave koje su se razvile u rudnicima na tim osnovama su poznate i često su opisivane u stručnoj literaturi. Uređaj koji se koristi za mjerenje poprečnih profila u jamskim uvjetima mora biti: jednostavan, male težine, prosječne preciznosti, neosjetljiv na udar i prije svega jeftin.

U novije vrijeme razvili su se i relativno skupi instrumenti za mjerenje na osnovi laserske tehnike, ali se oni kod nas rijetko upotrebljavaju u rudarskoj praksi.

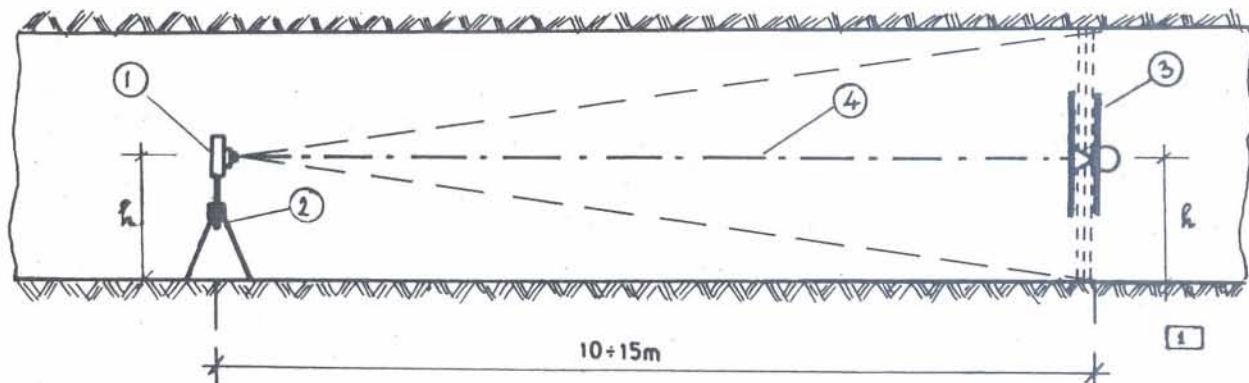
### Naprava za osvjetljavanje kod fotografskog snimanja poprečnog presjeka jamske prostorije

U Zavodu za rudarstvo i geotehniku RGN fakulteta u Zagrebu već se dugi niz godina obavljaju istraživanja strujanja zraka u jamskim prostorijama, mjerenjem vjetrenih parametara in situ. Veliki napredak je postignut u razvoju opreme za mjerenje, koja je osim nabavke iz inozemstva dijelom i vlastite izrade. Do danas je izrađen niz uređaja za određivanje geometrijskih dimenzija poprečnog presjeka jamskih prostorija na osnovi mjerenja polarnih koordinata, kao i pantografa raznih konstrukcija. Testiranjem u rudnicima utvrđen je kao najprikladniji uređaj za mjerenje polarnih koordinata profila.

Za mjerenje u nepodgrađenim prostorijama kroz kredni vapnenac rudnika boksita, posljednjih godina razvijen je i jednostavni uređaj za fotografsko snimanje profila. Komplet uređaja sastoji se iz posebne naprave za osvjetljavanje i fotografskog aparata s odgovarajućim stativom. Način fotografiranja ovim uređajem vidljiv je iz shematskog prikaza na sl. 1 (Rendulić, 1990).

Naprava za osvjetljavanje postavlja se približno u sredinu profila prostorije, okomito na uzdužnu os, što se postiže usmjeravanjem uske trake svjetla iz naprave u objektiv fotografskog aparata. Naprava je konstruirana tako da se može učvrstiti na prsa pomoćnika mjerača ili na specijalni držač u obliku štapa.

Fotografski aparat uređaja učvršćen je na posebnom stativu na udaljenosti 10 do 15 m od naprave, na visini vizure  $h$ .



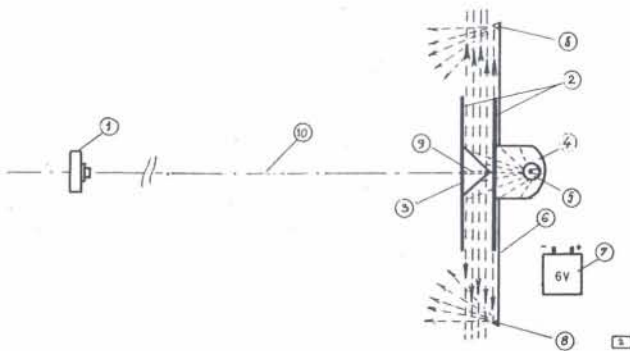
Sl. 1. Shematski prikaz fotografiranja poprečnog presjeka jamske prostorije: 1 – fotoaparat; 2 – stativ; 3 – uređaj za osvjetljavanje profila; 4 – orijentaciona os

Fig. 1. Schematical illustration of taking photograph of a mine opening cross-sectional area: 1 – Camera; 2 – Tripod; 3 – Illumination device; 4 – Orientational axis



Naprava je prikazana shematski na sl. 2, a sastoji se iz slijedećih glavnih dijelova:

- poniklani stožac s vršnim kutom  $90^\circ$ , probušen;
- dvije razmaknute planparalelne ploče, obojene crnom (mat) bojom;
- žarulja jačine 21 W, s reflektorom;
- akumulator 6 V, 12 Ah;
- letve s označenim krajevima za utvrđivanje mjerila slike.



Sl. 2 Uređaj za osvjetljavanje poprečnog presjeka jamske prostorije: 1 - fotoaparat; 2 - matirane ploče; 3 - stožac; 4 - reflektor; 5 - žarulja; 6 - letva za mjerenje; 7 - akumulator; 8 - stožac; 9 - otvor u stožcu  $d=1$  mm; 10 - orijentacijska os.

Fig. 2 Device for illumination of a mine opening cross-sectional area: 1 - Camera; 2 - Opaque plates; 3 - Cone; 4 - Reflector; 5 - Electric bulb; 6 - Measuring lath; 7 - Accumulator; 8 - Cone; 9 - Orifice in cone,  $d=1$  mm; 10 - Orientational axis.

Kod fotografiranja treba upotrebiti crno-bijeli film osjetljivosti 27 DIN. Razvijeni negativ filma služi za izradu fotografije u određenom mjerilu, koje se namješta odgovarajućim razmakom snimljenih oznaka na mjernim letvama, uz pomoć aparata za povećavanje (sl. 3). Mjerilo slike određuje se iz odnosa:

$$M = l_p / l_s, \quad (5)$$

gdje su:

$l_p, l_s$  - duljina razmaka između oznaka na mjernoj letvi u prirodi i razmaka između fotografiranih oznaka na slici, m.

Fotografija snimljenog profila jamske prostorije u M 1:50, prikazana je na sl. 4.

Fotografija profila jamske prostorije precrtana na prozirni papir, omogućuje jednostavno određivanje površine i opsega profila upotrebom planimetra i kurvimetra.

Obračun površine i opsega profila uz pomoć malo boljeg elektronskog računala sastoji se u izmjeri 36 radijusa, na razmaku  $\Delta\alpha = 10^\circ$  u ruži od  $360^\circ$ , s ishodištem približno u sredini profila (sl. 5). Proračun se izvodi upotrebom jednostavnih trigonometrijskih formula za površinu i duljinu stranice elementarnog kosokutnog trokuta, koje glase:

$$\Delta F = /s(s-R_1)(s-R_2)(s-\Delta U)^{1/2}, \quad (6)$$

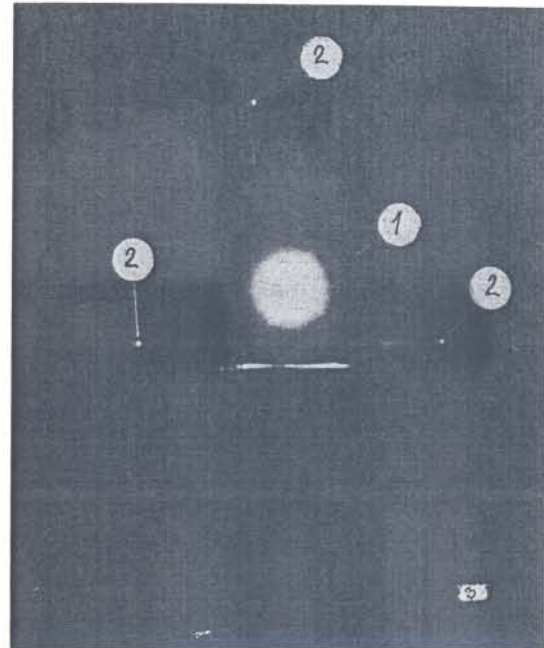
$$s = (R_1 + R_2 + \Delta U)/2,$$

$$\Delta U = (R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos \Delta\alpha)^{1/2}, \quad (7)$$

gdje su:

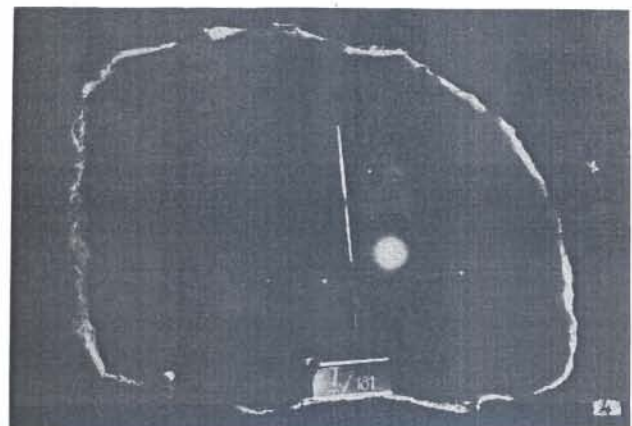
$\Delta F$  - površina elementarnog trokuta,  $m^2$ ;

$s$  - polovični opseg trokuta, m;  
 $\Delta U$  - stranica nasuprot kutu  $\Delta\alpha$  u trokutu, m;  
 $R_1, R_2$  - odgovarajući polumjeri krugova od ishodišta u sredini profila do konture, m.



Sl. 3 Fotografija uređaja za osvjetljavanje poprečnog presjeka jamske prostorije, kod ispitivanja u laboratoriju, M 1:25: 1 - aureola; 2 - oznaka na mjernoj letvi.

Fig. 3 A photograph of device for a mine opening cross-section illumination, taken during laboratory testing, M 1:25: 1 - Aureole; 2 - Mark on measuring lath.



Sl. 4 Fotografija poprečnog profila jamske prostorije I/181

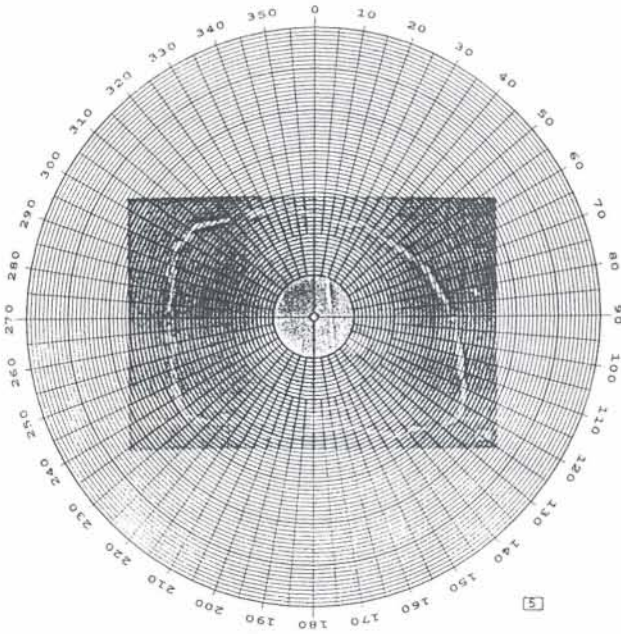
Fig. 4 A photograph of cross-sectional area of the mine opening I/181

Ukupna površina i opseg profila dobiva se zbrajanjem elementarnih površina ( $\Sigma\Delta F_i$ ) i duljina stranica ( $\Sigma\Delta U_i$ ) trokuta.

Veličina poprečnog profila u dionici jamske prostorije mjeri se kod svake značajnije promjene. Dobivene vrijednosti pojedinih površina presjeka obračunavaju se dalje sa svrhom dobivanja prosjeka, jer se razmaci između snimljenih profila kao i njihove geometrijske veličine međusobno razlikuju.

Prosječnim profilom zadovoljava se zahtjev Darcy-Weissbachove jednadžbe, koja je u osnovi izvedena kod ispitivanja strujanja kroz cijevi. Od broja mje-





Sl. 5 Dijagram konture poprečnog presjeka jamske prostorije I/181

Fig. 5 Dijagram of cross-sectional outline of the mine opening I/181

renih profila u dionici jamske prostorije ovisi i točnost ocjene prosječnog profila kao ulaznog podatka u formulu za proračun otpora.

**Proračun prosječnog profila jamske prostorije**

Oblik i površina poprečnih profila u dionici nepodgrađene jamske prostorije nisu stalne veličine. Ako se uzme u obzir činjenica da je i razmak između profila raznolik, vrlo je teško ocijeniti prosječnu površinu prostorije točnije od oko 10%.

Pod pretpostavkom da svaki od profila djeluje s polovicom razdaljine do susjednog profila, duljina zone utjecaja profila u dionici može se odrediti proračunom iz slijedećih jednadžbi:

$$\text{Profil } F_1 \dots I_1 = \frac{S_2 - S_1}{2} = \frac{S_2}{2}$$

$$\text{Profil } F_2 \dots I_2 = \frac{S_3 - S_2}{2} + \frac{S_2 - S_1}{2} = \frac{S_3 - S_1}{2} \quad (8)$$

$$\text{Profil } F_n \dots I_n = \frac{S_{n+1} - S_n}{2} + \frac{S_n - S_{n-1}}{2} = \frac{S_{n+1} - S_{n-1}}{2}$$

gdje su:

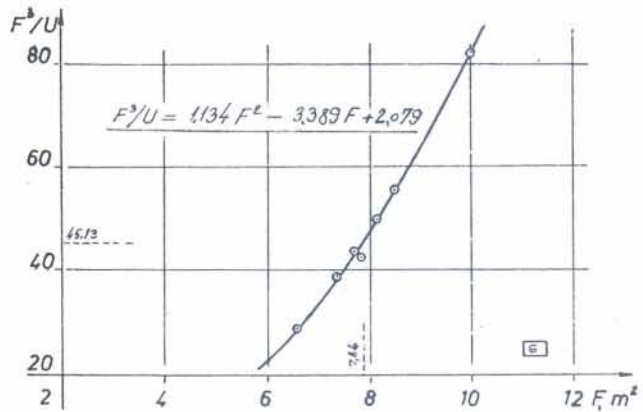
S<sub>1</sub> do S<sub>n</sub> – stacionaže mjerenih profila, m;

I<sub>1</sub> do I<sub>n</sub> – duljine zona utjecaja profila u dionici, m.

Kod podgrađenih prostorija duljinom zone utjecaja profila treba smatrati razmak s istovrsnom podgradom do prve promjene profila.

U tab. 1 proračunat je prosječni odnos F<sup>3</sup>/U za dionicu vjetrorenog uskopa u krednom vapnencu rudnika boksita. Izmjereno je sedam poprečnih profila za čije površine je izračunata standardna devijacija s = 1,07 i aritmetička sredina  $\bar{x}$  = 8,01. Relativna mjera disperzije određena je s koeficijentom varijacije V = 13,3%.

Odnosi F<sup>3</sup>/U i U/F<sup>3</sup> te duljine zone djelovanja profila iskazani su u kolonama 6,7 i 5 tablice. Prosječni odnos F<sup>3</sup>/U dionice prikazan je u koloni 6 tablice, u okviru.



Sl. 6 Prosječni odnos F<sup>3</sup>/U u ovisnosti od površine poprečnog presjeka jamske prostorije.

Fig. 6 Average relation F<sup>3</sup>/U depending on cross-sectional area of a mine opening.

Tablica 1. Proračun odnosa F<sup>3</sup>/U nepodgrađenog vjetrorenog uskopa  
Table 1. Calculation of the relation F<sup>3</sup>/U of untimbered ventilation rise drift

Naziv Name	Udaljenost Distance S, m	Profil – Profile		Utjecaj Influence I, m	F <sup>3</sup> /U m <sup>5</sup>	Proračun – Calculation		
		Površina Area F, m <sup>2</sup>	Opseg Perimeter U, m			U/F <sup>3</sup> m <sup>-5</sup>	(U/F <sup>3</sup> ) <sub>1</sub> m <sup>6</sup>	U/F <sup>3</sup> m <sup>-5</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
180	0,0	6,53	9,80	6,90	28,4128	0,0352	0,2428	
180-A	13,8	7,93	10,25	11,15	39,3740	0,0254	0,2832	
180-B	22,3	8,10	10,60	8,05	50,1359	0,0199	0,1606	
180-C	29,9	7,71	10,50	10,90	43,6490	0,0229	0,2497	
181	44,1	8,47	10,98	10,80	55,3411	0,0181	0,1952	
181-A	51,5	9,99	12,27	7,80	81,2553	0,0123	0,0960	
182	59,7	7,85	11,27	4,10	42,9225	0,0233	0,0955	
Prosjek Average		7,835	10,658		45,1264			0,02216
Ukupno Total				59,70			1,3230	

Za dani primjer zavisnost funkcije  $F^3/U = f(F)$  prikazana je dijagramom na sl. 6. Matematički oblik krivulje koja najbolje zadovoljava u dijagramu disperzije, dobiven je metodom najmanjih kvadrata i glasi:

$$F^3/U = 1,134 F^2 - 3,389 F + 2,064$$

Rješenjem jednadžbe, uz poznati odnos  $F^3/U$ , dobivena je prosječna površina profila dionice podzemne prostorije  $F = 7,835 \text{ m}^2$  i prosječni opseg  $U = 10,658 \text{ m}$ . Vrijednosti prosječnog profila naznačene su u kolonama 3 i 4 tablice 1.

### Zaključak

Specifični otpor ( $R_{100}$ ) jamske vjetrove prostorije (4) ovisi od veličine koeficijenta hidrauličkog trenja ( $\lambda$ ), srednje gustoće zraka u strujanju ( $\rho$ ) i od prosječnog odnosa  $U/F^3$ , koji treba određivati naročito pažljivo. Opisani način mjerenja profila in situ uz pomoć predložene naprave daje zadovoljavajuće rezultate, isproban je u rudnicima, zahtijeva poslugu

od dva radnika, a primjena elektronskog računala omogućava veću brzinu kod obračunavanja.

Primljeno: 16. I. 1992.

Prihvaćeno: 9. VI. 1992.

### LITERATURA

- Neumann, W., Plasche, F., Sonnemann, G. (1963): Wetterlehre und Grubenbrandbekämpfung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Rendulić, V. (1990): Otpori strujanju jamskog zraka u rudarskim prostorijama, Disertacija obranjena na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu, 217, Zagreb.
- Skotschinski, A. A., Komarow, W. B. (1956): Grubenbewetterung. VEB Verlag Technik, 219, Berlin.
- Teply, E. (1990): Rudnička ventilacija. Sveučilište u Zagrebu, 196., Zagreb.
- Ušakov, K. Z., Burčakov, A. S., Medvedev, I. I. (1978): Rudnična aerologija. »Nedra« 98-109, Moskva.
- Vujec, S. (1970): Određivanje otpora strujanja zraka u jamskim vjetrovim provodnicima. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 1, 81, Ljubljana

## Improvement in Determination of an Average Mine Opening Profile

V. Rendulić

Resistance of ventilation current in mines is not a constant value because it is linearly proportional to a changable ratio of hydraulic friction ( $\lambda$ ) which depends on Reynolds number and relative roughness ( $k/D$ ), as well as on relation of geometric dimensions of a profile  $U/F^3$ . A resistance value especially depends on determination of a cross-sectional area of a ventilated opening. A 10% error in determination of cross-sectional area influences a complete calculation error for approximately 33% and consequently reduces or enlarges the resistance value (4).

To avoid considerable errors in the resistance calculations, over the past few years a device for taking photographs of

cross-sectional profiles of unsupported mine openings (Fig. 2) has been developed at the Institute of mining and geotechnics of the Faculty of mining, geology, and petroleum engineering. In Fig. 1 there is a schematical illustration of how the photograph taking is performed in principle in mine openings.

Calculation to determine an average ratio  $F^3/U$  is presented analytically in Table 1, and graphically in Fig. 6. Data for this illustration have been taken from actual practice.