

## KOEFICIJENTI OTPORA VJETRENOJ STRUJI UTVRĐENI MJERENJEM I KOEFICIJENTI PROCIJENJENI IZ LITERATURE

Vladimir RENDULIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

**Key-words:** Mine Ventilation, Factor of Resistance, Measurements, Specific Resistance ( $R_{100}$ )

Specific resistance ( $R_{100}$ ) for underground mine rooms can be calculated by the constant ( $C$ ). Constant ( $C$ ) enables defining of the resistance for any relation of dimensions  $F^3/U$  in similar mine rooms. Considerable anomalies were found by comparison of the resistance factor calculated from measurement data with estimated value of the factor from specialized literature on planning similar ventilation structures.

### Uvodna razmatranja

Otpor dionice jamskog vjetrog provodnika može se izračunati za bilo koju duljinu pa se također može izraziti i kao specifični otpor za dužinu od 100 m, tako da predstavlja karakteristiku provodnika određene geometrije i stupnja hrapavosti.

Brojčane vrijednosti specifičnog otpora ( $R_{100}$ ) preračunate na standardne uvjete (tlak  $p=101324,72$  Pa, temperatura  $t=15^{\circ}\text{C}$  i relativna vlažnost  $\varphi=60\%$ ) pomnože se odgovarajućim odnosom  $F^3/U$  i zbroje pa se izračuna prosječna vrijednost i dobiva se konstanta "C", koja se može odrediti i iz prosječnog hidrauličnog koeficijenta trenja ( $\lambda$ ), prema formuli:

$$C = \frac{\sum R_{100} (F^3/U)}{n} = \frac{\sum \lambda}{n} 15,25, \text{ kg/m}^2 \quad \dots(1)$$

gdje su:

F- površina poprečnog presjeka profila provodnika,  $\text{m}^2$ ;

U- opseg poprečnog presjeka, m.

n- broj mjerenja

Prosječna vrijednost specifičnog otpora ( $R_{100}$ ) izračunava se dijeljenjem konstante s odnosom  $F^3/U$

$$R_{100} = \frac{C}{(F^3/U)}, \text{ kg/m}^7 \quad \dots(2)$$

Tako izračunatim vrijednostima konstante i specifičnog otpora može se odrediti otpor sličnog vjetrog provodnika uz pretpostavku da nije nastupila promjena hidrauličnog koeficijenta trenja ( $\lambda$ ) provodnika (R e n d u l i ć, 1990 i 1993).

Kod projektiranja vjetrenja podzemnih rudnika koeficijenti otpora potrebni za proračune vjetrenja procjenjuju se i iz stručne literature pa se specifični otpor može izračunati iz formule:

$$R_{100} = 100\alpha U/F^3, \text{ kg/m}^7 \quad \dots(3)$$

Koeficijent ( $\alpha$ ), mnogo puta uzet je bez dovoljno podataka o karakteristikama budućeg vjetrog

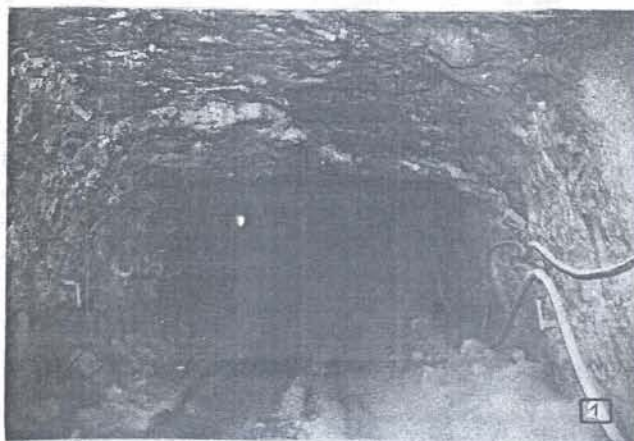
**Ključne riječi:** Vjetrenje rudnika, Koeficijent otpora, Mjerenje, Specifični otpor ( $R_{100}$ )

Određivanje specifičnog otpora ( $R_{100}$ ) za podzemne rudničke prostorije može se izvesti računski pomoću konstante ( $C$ ). Konstanta ( $C$ ) omogućava određivanje otpora za bilo koji odnos veličine  $F^3/U$  sličnih jamskih prostorija. Komparacijom vrijednosti koeficijenta otpora ( $\alpha$ ) određenog iz stručne literature kod projektiranja sličnog jamskog vjetrog objekta utvrđeno je znatno odstupanje.

objekta, zbog čega kod proračuna otpora vjetrog mreže mogu nastati značajnije pogreške.

### Rezultati proračuna mjerenja vjetrog struje

Mjerenjem u izvoznom niskopu, koji je bio objekt otvaranja jedne boksitne jame, obuhvaćen je veći dio izvorne prostorije izrađen u krednom vapnencu miniranjem, bez podgrade i manji dio u foraminiferskom vapnencu s mjestimičnom podgradom. Znači, osim nepodgrađenih dijelova prostorije bilo je i podgrađenih čeličnom lučnom podgradom te kombiniranom i betonskom podgradom. Ocijenjeno je da duljinom niskopa prevladaju nepodgrađeni dijelovi s oko 90%. Pod prostorije bio je suh i izrovan



prolaskom jamskog dampera. Oba boka niskopne prostorije bila su zauzeta materijalom razne vrste, a uz jedan bok bila je položena cijev za komprimirani zrak i kabel za dovoz električne energije, kako je to vidljivo na slici 1.

Promjena podgrade i profila te neregularne izbočine raznih oblika povećavale su hrapavost plašta prostorije tako da su u ukupnom otporu dionice značajan utjecaj imali i čelni otpori. Veličina poprečnog presjeka izvoznog niskopa varirala je u mjerenim

dionicama od 9 do 11 m<sup>2</sup>. Veća ili manja točnost proračuna vjetrove mreže s upotrebom konstante "C" kod određivanja specifičnog otpora (R<sub>100</sub>) ovisi od ocjene projektanta i njegove vizije izgleda budućeg vjetrovog provodnika u pogonskim uvjetima.

Koeficijent trenja (λ) za standardne uvjete (T e p-ly, 1990) računa se pomoću formule:

$\lambda = 0,0656 R_{100} F^3/U$ , a odgovarajući koeficijent otpora

$$\alpha = 0,1525 \lambda, \text{ kg/m}^3 \delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{a} 100, \% \dots (4)$$

Tablica 1 Obračun mjerenja vjetrove struje u izvoznom niskopu jame za standardne uvjete

Table 1 Accounting of air-current measurements in the haulage incline for standard conditions

Redni broj mjerenja <i>Ordinary number of measurements</i>	Količina zraka Q, m <sup>3</sup> /s <i>Air quantity</i>	Reynoldsov broj Re <i>Reynolds number</i>	Specifični otpor R <sub>100</sub> , kg/m <sup>7</sup> <i>Specific resistance</i>	Koeficijent trenja λ <i>Friction factor</i>	Odnos F <sup>3</sup> /U, m <sup>3</sup> <i>Relation</i>
1	2	3	4	5	6
1	25,566	544481	0,0150	0,0981	99,761
2	22,902	487651	0,0161	0,1053	99,761
3	19,790	421879	0,0140	0,0916	99,761
4	26,831	570117	0,0130	0,0850	99,761
5	24,169	512848	0,0136	0,0890	99,761
6	20,987	445003	0,0123	0,0805	99,761
7	23,405	488522	0,0097	0,0611	96,024
8	23,705	496562	0,0123	0,0774	96,024
9	22,784	567653	0,0180	0,0814	68,921
10	25,494	534718	0,0126	0,0793	96,024
11	23,699	590057	0,0185	0,0836	68,921
Prosjeck Average	23,575	514499	0,0141	0,0848	93,134

Konstanta.... C=1,2934

U izvoznom niskopu jame obavljeno je 11 mjerenja vjetrove struje čiji je obračun u standardnim uvjetima prikazan u tablici 1. Jednadžba aproksimacijske krivulje izmjerenih točaka glasi:

$$R_{100} = 113,05 \left(\frac{Q}{10^3}\right)^2 + 5,186 \left(\frac{Q}{10^3}\right) - 44,920 \cdot 10^{-3}$$

Konstruirani dijagram (Sl. 2) prema funkciji prikazuje ekstremnu točku (M) slijedećih koordinata:

$$Q = 22,937 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$R_{100} = 0,014555 \text{ kg/m}^7$$

ili zaokruženo:

$$Q \approx 22,9 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$R_{100} \approx 0,0146 \text{ kg/m}^7$$

### Komparacija proračunatih i procjenjenih koeficijenata otpora

Projektiranje vjetrove mreže za novu jamu izvodi se obično s podacima za koeficijent otpora (α) uzetim iz stručne literature. Podaci su u literaturi sistematizirani i prikazani u specijalnim tablicama koje obično vrlo oskudno opisuju karakteristike jamskih vjetrovih provodnika. Također u tablicama nedostaju i podaci o uvjetima koji su bili mjerodavni prilikom mjerenja jamske vjetrove struje i odre-

đivanja koeficijenta. Proračun vjetrove mreže s upotrebom koeficijenata uzetih iz literature opterećen je zbog toga pogreškama u pojedinim granama vjetrovog sustava, uslijed kojih je proračunata depresija veća od stvarno potrebne. Veličina pogreške (δα) procjenjenog koeficijenta otpora iz literature, kod projektiranja vjetrova jedne boksitne jame prikazana je u tablici 2.

Sve prostorije izradene su u krednom ili foraminiferskom vapnencu miniranjem, nisu podgrađene ili samo mjestimično.

Relativna pogreška (δα) koeficijenta otpora izražena u postocima je odnos apsolutne pogreške približnog broja i samog broja

$$\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{a} 100, \%$$

gdje su:

Δα - apsolutna pogreška, kg/m<sup>3</sup>;

a - približan broj.

U koloni 7 tablice 2 prikazana je pogreška koeficijenta otpora za različite vrste jamskih vjetrovih provodnika. Vidljivo je kretanje pogreške u širokim granicama od minimalne 45 do maksimalne 85%, što vrijedi za izvozni niskop.

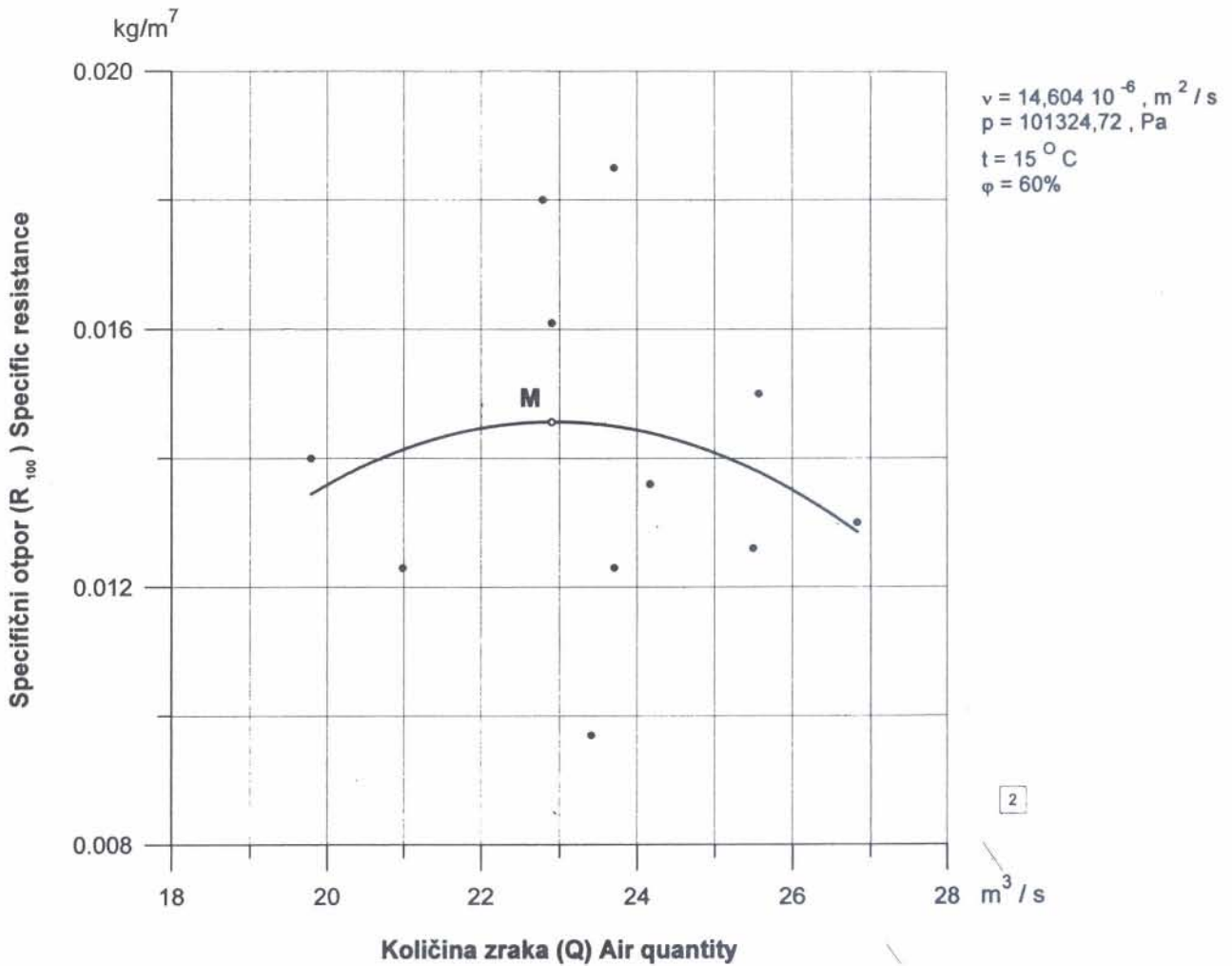
Za vrijeme izrade projekta vjetrova projektant nije raspolagao s mjerenim podacima nego se kod određivanja koeficijenata otpora (α) morao oslanjati isključivo na literaturne podatke.

Tablica 2 Pogreška (da) koeficijenata otpora (a) procjenjenog iz literature

Table 2 Error (da) of the resistance factor (a) estimated from the literature

Vjetrova prostorija <i>Ventilation opening</i>	Konstanta "C", kg/m <sup>3</sup> <i>Constant</i>	Odnos F <sup>3</sup> /U m <sup>3</sup> <i>Relation</i>	Otpor R <sub>100</sub> kg/m <sup>7</sup> <i>Resistance</i>	Koeficijent otpora mjeren α <sub>m</sub> kg/m <sup>3</sup>   procjenjen α <sub>p</sub> <i>Resistance factor measured, value added</i>	Pogreška δα % <i>Error</i>	min.	max.
1	2	3	4	5	6	7	8
Vjetrovo okno <i>Ventilation shaft</i>	2,9741	21,600	0,138	0,030	0,033	9,09	10,00
Vjetrovi uskop <i>Ventilation rise</i>	0,9713	46,618	0,021	0,010	0,013	23,08	30,00
Hodnik neznatno nečist <i>Drift slightly unclean</i>	1,0042	46,618	0,022	0,010	0,015	33,33	50,00
Hodnik nepodgrađen <i>Drift untimbered</i>	0,9584	91,142	0,011	0,010	0,013	23,08	30,00
Izvozni niskop <i>Haulage incline</i>	1,2934	91,142	0,014	0,013	0,024	45,83	84,62
Vjetrovi hodnik nečist <i>Ventilation drift, unclean</i>	1,5664	46,618	0,034	0,016	0,015	6,25	6,67

R<sub>100</sub> - specifični otpor na duljini od 100 m jamske prostorije, kg/m<sup>7</sup>.  
*specific resistance of ventilation opening 100 m length.*



**Analiza projekata vjetrenja izrađenih u razdoblju od 1981. do 1986. godine za slične boksitne jame.**

Pregled intervala odstupanja u izrađenim projektima vjetrenja sličnih boksitnih jama s vjetrenim prostorijama u krednom vapnencu i upotrebom dizelske opreme u eksploataciji, prikazan je u tablici 3.

Može se opaziti tendencija smanjenja pogreške procijenjenog koeficijenta otpora kod projekata novijih datuma u kojima se već djelomično počelo rabiti mjerene podatke.

Iskazana pogreška ( $\delta\alpha$ ) koeficijenta otpora ( $\alpha$ ) u postocima djeluje u smjeru povećanja otpora jamske vjetrene grane, zbog čega se dobiva veći ukupni otpor vjetrene mreže. Rezultantni otpor mreže, kao i utjecaj pogreške koeficijenta otpora, može se umanjiti ako se vjetrena mreža projektira sa što više paralelnih grana, tako da vrijedi:  $R_1 > R_{rez} < R_2$ .

Pogreška procijenjenog koeficijenta iz literature dolazi do punog izražaja kod projektiranja serijske vjetrene mreže rudnika.

Tablica 3 Pogreška koeficijenta otpora ( $\delta\alpha$ ) za slične projekte vjetrenja

Table 3 The resistance factor error ( $\delta\alpha$ ) for similar ventilation projects

Vjetrena prostorija Ventilation opening	"Jukići-Đidare" 1981.	"Trobukva" 1983.	"Baturinka" 1984.	"Čukovac" 1985.	"Krs" 1986.	
	Relativna pogreška ( $\delta\alpha$ %) / Relative error					
	1	2	3	4	5	6
Vjetreno okno Ventilation shaft	11,76 - 13,33	-	-	-	14,28 - 16,67	21,05 - 26,67
Vjetreni uskop Ventilation rise	16,70 - 20,00	28,57 - 40,00	28,57 - 40,00	-	-	23,08 - 30,00
Vjetreni hodnik neznatno nečist Ventilation drift slightly unclean	16,67 - 20,00	3,33 - 50,00	-	-	0	16,67 - 20,00
Hodnik nepodgrađen Drift untimbered	23,08 - 30,00	25,92 - 35,00	20,00 - 25,00	-	0	13,04 - 15,00
Izvozni niskop Haulage incline	35,00 - 53,85	18,75 - 23,00	7,80 - 8,46	13,33 - 15,38	-	48,00 - 92,31
Vjetreni hodnik nečist Ventilation drift, unclean	18,75 - 23,08	0	21,88 - 28,00	12,50 - 14,28	-	12,50 - 14,28

Primjer:

Specifični otpor ( $R_{100}$ ) za 100 m izvoznog niskopa izračunat s koeficijentom otpora ( $\alpha$ ), koji je određen mjerenjem vjetrove struje in situ, iznosi  $0,014 \text{ kg/m}^7$ . Ako se računa s koeficijentom otpora određenim na temelju procjene iz literature kod projektiranja, specifični otpor iznosi tada  $0,026 \text{ kg/m}^7$ .

Uz pretpostavku, da je točna vrijednost specifičnog otpora ( $R_{100}$ ) proračunata na temelju mjenog podatka, apsolutna pogreška iznosi:

$$\Delta = 0,026 - 0,014 = 0,012 \text{ kg/m}^7.$$

Relativna pogreška kod toga varira u granicama od minimalno

$$\delta_1 = \frac{0,012}{0,026} 100 = 46,15 \%$$

do maksimalno

$$\delta_2 = \frac{0,012}{0,014} 100 = 85,70 \%$$

### Zaključak

Analiza izrađenih projekata podzemnih rudnika boksita s izrađenim vjetrovim prostorijama bez podgrade, utvrdila je znatna odstupanja vrijednosti koeficijenata utvrđenih proračunima na osnovi mjerenih podataka. Silaskom na dublje horizonte u rudnicima sve se više povećavaju količine opasnih plinova i raste temperatura. Određivanje točnih

vrijednosti koeficijenata otpora u jamskim prostorijama ostaje stoga i dalje nedovoljno istraženo.

Koeficijent trenja ( $\lambda$ ) može se točno utvrditi jedino eksperimentalnim putem na temelju izmjera parametara strujanja. Izmjerom se dolazi do pouzdanijih podataka koji se mogu rabiti kod projektiranja vjetrova u fazi razvoja rudnika. Ako se radi o novom rudniku mogu se koristiti podaci dobiveni iz drugog rudnika sa sličnim uvjetima.

Proračunati linearni otpor  $R_{100}$  provodnika zavisi o gustoći zraka, karakteristici presjeka  $U/F^3$  i koeficijentu trenja ( $\lambda$ ). Računanje s koeficijentom otpora ( $\alpha$ ) uobičajeno je i jednostavno, ali se u proračun na taj način unosi pogreška, jer se praktički računa s konstantnom veličinom gustoće ( $\rho$ ) zraka, koja inače u jamskim prostorijama varira oko 10%. Iz toga razloga daje se prednost računanju s koeficijentom trenja ( $\lambda$ ) koji zavisi o Reynoldsovom broju i stupnju hrapavosti provodnika.

Primljeno: 1996.01.24.

Prihvaćeno: 1996.06.25.

### LITERATURA

- R e n d u l i ć, V. (1990): Otpori strujanju jamskog zraka u rudarskim prostorijama, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 217 pp, Zagreb.
- R e n d u l i ć, V. (1993): Otpor strujanju zraka na 100 m duljine podzemne prostorije. *Rud.-geol.-naft.zb.* 5, 123-127, Zagreb
- T e p l y, E. (1990): Rudnička ventilacija. Sveučilište u Zagrebu, 356 pp, Zagreb.

## Factors of Resistance against Air Current Established by Measurement and Factors Estimated by

### Literature

V. Rendulić

On the basis of many measurements of the mine air current in the main haulage incline of a bauxite pit, ventilation factors were established and friction coefficients were calculated for standard conditions (pressure, temperature and relative humidity) and presented in Table 1.

By comparative analysis of similar ventilation projects performed till now, factors of resistance ( $\alpha$ ) were studied, established on the basis of measurement data for mine air current, and the factors estimated from specialized literature. Some anomalies were found between the factors.

The resistance factor is systematized and presented for different types of mine air-current conductors in specialized literature.

Some anomalies were found between the factors.

The resistance factor is systematized and presented for different types of mine air-current conductors in specialized literature. Calculation with this factor is usual and simple, but it is calculated with a constant air density value. Air density ( $\rho$ ) in mine condition varies around 10 %.

The coefficient of friction ( $\lambda$ ) can be accurately established only experimentally, on the basis of air-current factors in a pit. This coefficient is without dimensions and it depends mainly on air-current velocity. It is therefore advantageous in the calculation of resistance against mine air current.