

## METODE UTVRĐIVANJA NAJPOVOLJNIJIH EKSPLOZIVA U RAZLIČITIM STIJENAMA

Josip KRSNIK<sup>1</sup> i Josip MESEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu  
Institut za rudarstvo, geotehniku i naftu, Pierottijeva 7, YU—41000 Zagreb  
<sup>2</sup>Viša geotehnička škola u Varaždinu, Hinkovićeve 7, YU—42000 Varaždin

**Ključne riječi:** Najpovoljniji eksplozivi, Optimalne veličine miniranja, Metoda pokusnog miniranja s linearnim povećanjem izbojnice.

Najpovoljniji eksplozivi za miniranje pojedinih vrsta stijena utvrđene su metodom pokusnog miniranja s linearnim povećanjem izbojnice. Istom metodom utvrđene su optimalne veličine za miniranje s dubokim manskim bušotinama.

**Key-words:** Most appropriate explosives, Optimum blasting magnitudes, Test blasting method with linear burden increase.

The most appropriate explosives required for blasting of the particular types of rocks were established by test blasting method with linear burden increase. By the same method the optimum magnitudes of deep-holes blasting were established.

### Uvod

Na efekte miniranja znatno utječe vrsta najpovoljnijeg eksploziva. Utvrđivanje najpovoljnijeg eksploziva za miniranje različitih vrsta stijena provedeno je na velikim površinskim kopovima i kamenolomima sedimentnih stijena u našoj zemlji, te na Aswanskoj brani u Egiptu. U tu svrhu korištene su dvije metode utvrđivanja najpovoljnijeg eksploziva u svakoj stijeni i to:

- metoda pokusnog miniranja s linearnim povećanjem izbojnice, (K r s n i k, 1979)
- ekvivalentna metoda, (D o h r, 1981).

U svakoj stijeni izvršena su pokusna miniranja s različitim vrstama eksploziva. Na osnovi volumena odloma pokusnih manskih bušotina s linearnim povećanjem izbojnice utvrđeni su najpovoljniji eksplozivi u pojedinim stijenama. U istim stijenama izmjerene su brzine širenja uzdužnih valova i gustoće, radi utvrđivanja najpovoljnijeg eksploziva ekvivalentnom metodom na osnovi jednakih akustičkih impedancija stijene i eksploziva.

### Pokusna miniranja u različitim vrstama stijena

U razdoblju od 1982. do 1986. godine obavljeno je 11 pokusnih miniranja na etažama površinskih kopova i kamenoloma:

1. Kamenolom Podsusedsko Dolje — jako raspucali dolomit,
2. Kamenolom Očura — raspucali dolomit,

3. Površinski kop ugljena Turija — gusti žilavi lapor,
4. Površinski kop ugljena Turija — raspucali vapnenački lapor,
5. Površinski kop ugljena Grivice — gusti žilavi lapor,
6. Površinski kop ugljena Grivice — raspucali vapnenački lapor,
7. Kamenolom Aswanska brana — raspucali granit,
8. Kamenolom Dubac — jako raspucali vapnenac,
9. Kamenolom Belski Dol — slabo raspucali vapnenac,
10. Kamenolom Most Raša — srednje raspucali vapnenac,
11. Kamenolom Bast — slabo raspucali vapnenac.

Za pokusna miniranja korištene su u načelu tri vrste eksploziva i to najjači, srednje jakosti i najslabiji. Međutim, u kamenolomima Podsusedsko Dolje isprobano je 6 vrsta eksploziva, a u kamenolomu Belski Dol samo 2 vrste manje brizantnih eksploziva radi dobivanja krupnije granulacije kamena za obalotvrde. Pokusna miniranja su izvedena na etažama visine 15—40 m, s promjerima pokusnih manskih bušotina 75—115 mm.

### Rezultati pokusnih miniranja s različitim vrstama eksploziva

Otpucavanjem pokusnih manskih bušotina napunjenih različitim vrstama eksploziva do-

Tablica Table 1

Najpovoljniji eksplozivi utvrđeni pokusnim miniranjima s različitim vrstama eksploziva.  
*Most appropriate explosives established by test blasting with different types of explosives*

Naziv objekta Plan title	Vrsta stijene Type of rock	Eksplozivi za pokusna miniranja Explosives for test blasting	Utvrđena najpovolj- nija vrsta eksploziva Most ap- propriate type of explosive	Gustoća najpovolj- nijeg eks- ploziva Most ap- propriate explosive density (kg/m <sup>3</sup> )	Detonacij- ska brzina, najpovolj- nijeg eks- ploziva Detonation velocity of most ap- propriate ex- plosive Vd (m/s)	Akustička impendan- cija naj- povolj- eksploziva Acoustical impeden- dance of most ap- propriate explosive Ie (kg/m <sup>2</sup> s) · · 10 <sup>3</sup>	Optimalna duljina linije najmanj. otpora najpovolj- eksploziva Optimum burden length Wopt (m)
Kamenolom Stone quarry Podsusedsko Dolje	jako raspucali dolomit badly fractured dolomite	V-5a, A-V, NI Ap-V, detonal K-M15	Ap-V	1060	4400	4664	4,5
Kamenolom Stone quarry Očura	jako raspucali dolomit badly fractured dolomite	NI, A-V, A <sub>0</sub> -V	Ap-V	1060	4400	4664	4,4
Površinski kop Open pit Turija	gusti žilavi lapor hardy compact marl	V-20, Amonex NI	NI	1000	3300	3300	4,0
	raspucali čvrsti lapor fractured solid marl	V-20, Amonex NI	NI	1000	3300	3300	3,2
Površinski kop Open pit Grivice	gusti žilavi lapor hardy compact marl	V-20, Amonex NI	NI	1000	3300	3300	4,0
	čvrsti raspulaci vapnenački lapor fractured solid calcareous marl	V-20 Amonex NI	NI	1000	3300	3300	3,2
Aswanska brana Aswan waterdam	jako raspucali granit badly fractured granite	PD, ANFO, AGO	ANFO	800	3000	2400	2,8
Kamenolom Stone quarry Dubac	jako raspucali vapnenac badly fractured limestone	A-V, A <sub>0</sub> -V K-C	A-V	1050	4300	4515	3,5
Kamenolom Stone quarry Belski dol	slabo raspucali vapnenac slightly fractured limestone	NI, A-V	A-V	1050	4300	4515	3,5
Kamenolom Stone quarry Most Raša	srednje raspucali vapnenac medium fractured limestone	NI, A-V Geokamex	A-V	1050	4300	4515	3,0
Kamenolom Stone quarry Bast	slabo raspucali vapnenac slightly fractured limestone	NI, A-V, Geokamex	A-V	1050	4300	4515	3,0

bivene su različite veličine odloma stijene i duljine linija najmanjeg otpora (izbojnice).

Volumeni odloma pokusnih minskih bušotina izračunati su metodom paralelnih profila koji su dobiveni fotogrametrijskim snimanjem etaže prije i poslije otpucavanja pokusnih minskih bušotina. Na osnovi maksimalnog volumena odloma i maksimalne izbojnice utvrđeni su najpovoljniji eksplozivi u pojedinim stijenama. Najpovoljniji eksplozivi i njihove akustičke impedancije navedeni su u tablici 1.

### Mjerenje brzine širenja uzdužnih valova i gustoće stijena

Mjerenje brzine širenja uzdužnih valova u ispitivanim stijenama izvedeno je refrakcijsko seizmičkom metodom (Dohr, 1981, Jakovsky, 1963, Jelić i dr., 1979).

Gustoća ispitivanih stijena određena je karotažnim mjerenjima u pokusnim minskim bušotinama gama — gama metodom.

Za mjerenje brzine širenja uzdužnih valova korišteni su slijedeći instrumenti:

- TRIO SX 12, švedske proizvodnje ATLAS — COPCO
- ES — 6, američke proizvodnje NIMBUS
- TERRA — SCOUT R 150, američke proizvodnje SOILTEST.

Za mjerenje gustoće stijena korišten je instrument OYO japanske proizvodnje.

### Rezultati mjerenja

Na osnovi podataka mjerenja brzina širenja uzdužnih valova i gustoće stijena utvrđene su akustičke impedancije za svaku ispitivanu stijenu. Podaci mjerenja i izračunate akustičke impedancije stijena predloženi su u tablici 2.

### Analiza i interpretacija rezultata pokusnih miniranja i mjerenja

Na osnovi rezultata pokusnih miniranja s linearnim povećanjem izbojnice koji su predloženi u tablici 1 utvrđena je zavisnost između vrste eksploziva i strukture stijene.

Pokusnim miniranjima u istoj stijeni s različitim vrstama eksploziva postignuti su različiti volumeni odloma minskih bušotina na osnovi kojih je utvrđena najpovoljnija vrsta eksploziva za dotičnu stijenu. Kod toga je utvrđeno da su za istu vrstu stijene s različitim brzinama širenja uzdužnih valova i gustoćom najpovoljnije iste vrste eksploziva kako slijedi:

- za miniranje u jako raspucalim dolomitima s brzinama širenja uzdužnih valova od 1500 m/s najpovoljnija vrsta eksploziva je amonal pojačani,

Tablica Table 2

Podaci mjerenja brzina širenja uzdužnih valova i gustoće ispitivanih stijena i akustičke impedancije stijena.

Measurement data of propagation velocities of longitudinal waves and density of explored rocks and acoustical rock impedances.

Naziv objekta Plant title	Brzine širenja uzdužnih valova	Gustoća stijene	Akustična impedancija stijene
	Propagation velocities of longitudinal waves	Rock density	Acoustical rock impedance
	V <sub>u</sub> V <sub>i</sub>	(kg/m <sup>3</sup> )	Is Ir (kg/m <sup>2</sup> s) · 10 <sup>3</sup>
Kamenolom Stone quarry Podsusedsko Dolje	1480	2810	4158
Kamenolom Stone quarry Očura	1500	2750	4125
Površinski kop Open pit Turija	2100	2100	4410
Površinski kop Open pit Grivice	1760	2300	4043
Površinski kop Open pit Grivice	2200	2470	5434
Aswanska brana Aswan wateradm	3350	2250	7537
Aswanska brana Aswan wateradm	2600	2690	6994
Kamenolom Stone quarry Dubac	2550	2690	6859
Kamenolom Stone quarry Belski Dol	3700	2610	9657
Kamenolom Stone quarry Most Raša	4220	2620	11062
Kamenolom Stone quarry Bast	4450	2690	11965

— u raspucalim laporima i granitu s brzinom širenja uzdužnih valova od 1700 do 2600 m/s najpovoljnija vrsta eksploziva su ANFO smjese odnosno nitroli,

— u raspucalim vapnencima s brzinom širenja uzdužnih valova od 2550 do 4450 m/s najbolji rezultati ostvareni su s eksplozivom amonal V.

Na osnovi podataka mjerenja brzina uzdužnih valova i gustoće stijena izračunate su veličine akustičkih impedancija ispitivanih stijena čije vrijednosti su date u tablici 2.

Vrijednosti akustičkih impedancija stijena i najpovoljnijih eksploziva poslužile su za izračunavanje koeficijenta iskorištenja potencijal-

Tablica Table 3  
Vrijednosti koeficijenta iskorištenja (Ki) i refleksije (Kr).  
Values of the usage (Ki) and reflection (Kr) ratios

Naziv objekta Plan title	Akustička impedancija stijene Acoustical rock im- pedance $I_s, I_r$ (kg/m <sup>2</sup> s) · 10 <sup>3</sup>	Akustička impedancija najpovoljnijeg eksploziva utvrđ. pokus. miniranjem Acoustical im- pedance of most appropriate explosive $I_e$ (kg/m <sup>2</sup> s) · 10 <sup>3</sup>	Optimalna (duljina) linije najmanjeg otpora Optimum burden length $W_{opt}$ (m)	Koeficijent isko- rištenja pot- encijalne energije najpovoljnijeg eksploziva Usage ratio of explosive poten- tial energy $K_i, K_u$	Koeficijent refleksije Reflection ratio $K_r$
Kamenolom Stone quarry Podsusedsko Dolje	4159	4664	4,5	0,89	0,003
Kamenolom Stone quarry Očura	4125	4664	4,4	0,88	0,004
Površinski kop Open pit Turija	4410	3300	4,0	1,34	0,021
Površinski kop Open pit Grivice	4048	3300	3,2	1,23	0,011
Površinski kop Open pit Grivice	5434	3300	4,0	1,65	0,060
Aswanska brana Aswan waterdam	7537	3300	3,2	2,28	0,152
Aswanska brana Aswan waterdam	6994	2400	2,8	2,91	0,239
Kamenolom Stone quarry Dubac	6859	4515	3,5	1,52	0,043
Kamenolom Stone quarry Belski Dol	9657	4515	3,5	2,14	0,132
Kamenolom Stone quarry Most Raša	11062	4515	3,0	2,45	0,189
Kamenolom Stone quarry Bast	11965	4515	3,0	2,65	0,204

ne energije najpovoljnijeg eksploziva i koeficijenta refleksije po formulama:

$$k_i = \frac{I_s}{I_e} \quad \text{— koeficijent iskorištenja potencijalne energije eksploziva,}$$

$I_s$  — akustička impedancija stijene,

$I_e$  — akustička impedancija najpovoljnijeg eksploziva.

$$k_r = \left( \frac{k_i - 1}{k_i + 1} \right)^2 \quad \text{— koeficijent refleksije.}$$

Dobivene vrijednosti koeficijenata iskorištenja i refleksije predočene su u tablici 3.

Na osnovi podataka iz tablice 3, izrađen je program na računaru Computer IBM PC/XT za utvrđivanje međusobne zavisnosti rezultata dobivenih pokusni miniranjem s linearnim povećanjem izbojnice i ekvivalentnom metodom.

Matematička zavisnost optimalne duljine linije najmanjeg otpora  $W_{opt}$  o koeficijentu is-

korištenja potencijalne energije eksploziva  $k_i$  utvrđena je programom za proračun vlastite izrade u programskom jeziku TURBO PASCAL, a definirana je jednadžbom parabole:

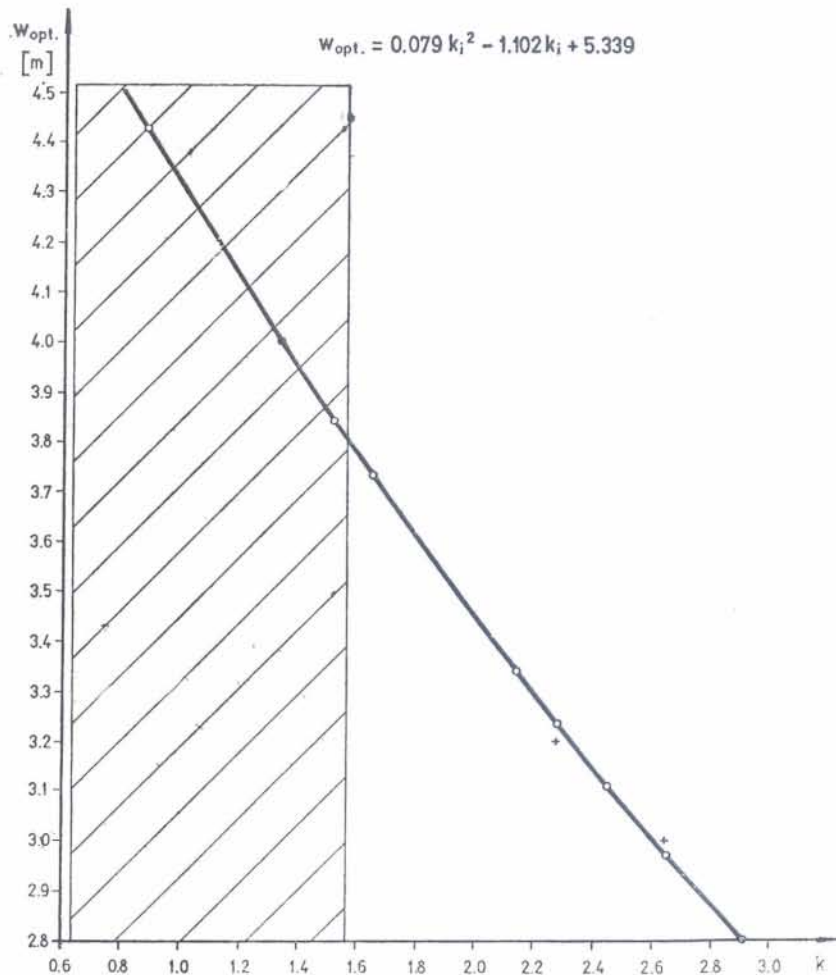
$$W_{opt} = 0,079 k_i^2 - 1,102 k_i + 5,339$$

te je prikazana dijagramom  $W_{opt} : k_i$  na slici 1.

Na dijagramu su ucertane granične vrijednosti koeficijenta iskorištenja  $0,630 \leq k_i \leq 1,576$ . Pri vrijednostima  $k_i > 1,576$  velike su razlike između akustičkih impedancija stijena i najpovoljnijih eksploziva.

Prema ekvivalentnoj metodi za miniranje tih stijena bili bi najpovoljniji najjači eksplozivi koji su korišteni za pokusna miniranja. Međutim, pokusnim miniranjima s linearnim povećanjem izbojnice u tim stijenama su utvrđeni kao najpovoljniji eksplozivi, sa znatno nižim vrijednostima akustičke impedancije od akustičkih impedancija ispitivanih stijena.

Prema tomu, rezultati dobiveni metodom pokusnih miniranja s linearnim povećanjem iz-



Sl. 1

Zavisnost optimalne duljine najmanjeg otpora  $W_{opt.}$  o koeficijentu iskorištenja potencijalne energije eksploziva  $K_i$

Fig. 1

Dependence of optimum burden length  $W_{opt.}$  upon usage ratio of explosive potential energy  $K_i$

bojnice i ekvivalentnom metodom međusobno se znatno razlikuju. Time je neosporno dokazano da ekvivalentna metoda nije pouzdana za utvrđivanje najpovoljnijeg eksploziva u pojedinim stijenama.

Vrijednosti koeficijenta iskorištenja potencijalne energije eksplozivnog punjenja ne mogu biti veće od jedinice jer je u tom slučaju akustička impedancija eksploziva manja od akustičke impedancije stijene, te nisu zadovoljeni uvjeti ekvivalentne metode o jednakosti akustičkih impedancija stijene i eksploziva.

Razlike u akustičnim impedancijama stijena i najpovoljnijih eksploziva mogu se pripisati utjecaju tektonskog sklopa, primarne strukture i petrografskom sastavu stijenskog masiva. Tektonski sklop utječe na granulaciju miniranog materijala. To je prvenstveno uvjetovano prostornim položajem i gustoćom diskontinuiteta na otkopnu frontu (Tomasić, 1986).

Vrlo veliki i različiti utjecaj na efekte miniranja u pojedinim vrstama stijena imaju primarni i sekundarni porozitet. Primarni porozitet je posljedica genetskih karakteristika stijene. Razlikuje se intergranularni, interfosilni

i zatvoreni, a sekundarni porozitet može biti interkristalni, izluženi i tektonski.

Kod fizikalno-mehaničkih svojstava dolomita gotovo je zanemaren porozitet sekundarnog porijekla koji je nastao naknadnom cementacijom diskontinuiteta. Prilikom djelovanja eksplozivnog impulsa odmah nastupa razaranje i drobljenje stijene te su za miniranje najpovoljniji jači eksplozivi s većom detonacijskom brzinom.

Vapnenci se odlikuju većom čvrstoćom i sekundarnim porozitetom. Pri djelovanju eksplozivnog impulsa dolazi do neznatnog sabijanja stijene a zatim nastupa razaranje i drobljenje stijene. Prema tomu, za razaranje tih stijena najpovoljniji su eksplozivi srednje jakosti s nešto većom detonacijskom brzinom.

Ispitivani lapori su izrazito neelastične i porozne stijene. Pri detonaciji eksplozivnog naboja u tim stijenama dolazi najprije do sabijanja i zatvaranja pora, a zatim nastupa razaranje i drobljenje. Zbog toga su za miniranje takvih stijena najpovoljniji slabiji eksplozivi s manjim detonacijskim brzinama kod kojih djelovanje detonacijskog impulsa vremenski dulje traje.

## Zaključak

Pokusna miniranja s linearnim povećanjem izbojnice te mjerenja brzine širenja uzdužnih valova i gustoće u različitim vrstama stijena izvedena su u proizvodnim uvjetima površinskih kopova i kamenoloma.

Analizom rezultata pokusnih miniranja s linearnim povećanjem izbojnice egzaktno su utvrđeni najpovoljniji eksplozivi za dolomite, lapore, vapnenačke lapore, granit i vapnence (Mesec, 1987).

Ta metoda poslužila je ujedno za provjeravanje rezultata dobivenih ekvivalentnom metodom. Rezultati dobiveni ekvivalentnom metodom ne podudaraju se s rezultatima dobivenim metodom pokusnih miniranja s linearnim povećanjem izbojnice.

Primljeno: 19. XII. 1988.

Prihvaćeno: 6. II. 1989.

Za određenu vrstu stijene najpovoljnija vrsta eksploziva ne zavisi od brzine širenja uzdužnih valova u njoj, što navodi na zaključak da se ekvivalentnom metodom ne mogu pouzdano utvrditi najpovoljnije vrste eksploziva. Znatna odstupanja javljaju se kod stijena čije su brzine uzdužnih valova veće od 2200 m/s s akustičnim impedancijama većim od  $5400 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Prema tomu, za utvrđivanje najpovoljnije vrste eksploziva treba koristiti metodu pokusnih miniranja s linearnim povećanjem izbojnice kojom se istovremeno utvrđuju i optimalne veličine za miniranje s dubokim minskim bušotinama.

Daljnja istraživanja treba usmjeriti na utvrđivanje najpovoljnije vrste eksploziva i za ostale vrste stijena.

## LITERATURA

- Dohr, G. (1981): Applied Geophysics. Ferdinand Enke Publishers. Stuttgart.  
 Informator broj 42: Detonacijske brzine i gustoća eksploziva »Kamnik«, Kamnik.  
 Jakosky, J. J. (1963): Geofizička istraživanja. Naučna knjiga. Beograd.  
 Jelić, K., Kovačević, S., Krulc, Z., Novinski, A., Zagorac, Z. (1979): Geofizika. Tehnička enciklopedija. Svezak 6. Zagreb.  
 Krsnik, J. (1979): Utvrđivanje veličina za miniranje s dubokim minskim bušotinama na površin-

skim kopovima i kamenolomima. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb.

Mesec, J. (1987): Utvrđivanje najpovoljnijeg eksploziva za miniranje različitih vrsta stijena. Magistarski rad. Zagreb.

Tomašić, I. (1986): Analiza tektonskog sklopa u svrhu razrade i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu. Zagreb.

## Methods for Determination of the Optimum Explosives in Different Rocks

J. Krsnik and J. Mesec

For each rock most appropriate explosive shall be established exhibiting the highest effect when blasting the relevant rock.

The most appropriate explosives required for blasting of the particular types of rocks may be determined by:

- Test blasting method with linear increase of burden
- equivalent method.

By the first method the most appropriate explosive is determined on the basis of the maximum rock breakage achieved by test blasting in the same rock with different types of explosives.

The equivalent method is based on the equality of the acoustical impedances of the rock and the most appropriate type of explosive.

The results of the mentioned methods applied to particular types of rocks diverge. Besides, the results obtained by the equivalent method are not reliable because they exhibit considerable differences of acoustical rock impedances and the most appropriate explosive.

Based on the results of test blasting and recording of the velocity of longitudinal waves and rock density it has been indisputably proved that the equivalent method cannot be used for the determination of the most appropriate explosive to be applied to blasting of the particular types of rocks.

The method of test blasting with linear burden increase shall be used to determine the most appropriate explosive. At the same time this method enables to establish the optimum magnitudes of blasting with deep blastholes.