

**RAČUNSKO-GRAFIČKA METODA ODREĐIVANJA POZICIJE  
MAŠINE U PROIZVODNOJ SHEMI PRIPREME**

**ACCOUNTING-GRAPHIC METHOD OF DETERMINING THE  
POSITION OF A MACHINE IN THE PRODUCTION SCHEME OF  
PREPARATION**

**dr. sc. Ifet Šišić vanr. prof.**  
**dr. sc. Osman Perviz vanr. prof.**  
**dr. sc. Samira Hotić docent**  
**mr. sc. Mahmut Jukić v. ass.**  
**Univerzitet u Bihaću, Bihać**

**REZIME**

*Računsko-grafička metoda nudi rješenje izbora pozicije mašina za usitnjavanje u tehnološkoj shemi pripreme (prerade) mineralnih sirovina kroz grafičke konstrukcije (grafikone) i proračunske pokazatelje, uzimajući u obzir uticajne faktore drobljenja u odnosima promjenljivih parametara mineralne sirovine i drobilica. Osnovni kriterijum za ocjenu tehničke i ekonomske opravdanosti izbora drobilica je stepen drobljenja  $n_d$  kao numerički pokazatelj učinka drobilice u pogledu smanjenja zrna. Osim stepena drobljenja u metodološkim tokovima izbora drobilica značajno mjesto imaju poziciona stadijalnost u shemi usitnjavanja ukupnog procesa pripreme i kvalitet usitnjenih proizvoda.*

**Ključne riječi:** parametri drobilica, stepen drobljenja, stadijum drobljenja, kvalitet proizvoda

**SUMMARY**

*The accounting-graphic method offers solutions for choosing the position of shredding machines in the technological scheme for the preparation (processing) of mineral raw materials through graphic designs (graphs) and budgetary indicators, taking into account the influence factors of crushing in the relationship between the variable parameters of mineral raw materials and crushers. The basic criterion for assessing the technical and economic justification of crushers is the degree of crushing  $n_d$  as a numerical indicator of the impact of the crusher in terms of grain reduction. In addition to the degree of fragmentation in the methodological choices of crushers, a significant position has a positional stage in the grinding scheme of the overall process of preparation and the quality of the crushed products.*

**Key words:** crusher parameters, crushing degree, crushing stage, product quality

**1. UVOD**

U postupku izbora drobilica i iznalaženja adekvatne pozicije drobljenja osnovni kriterijumi za ocjenu tehničke i ekonomske opravdanosti izbora drobilica su produktivnost i kvalitet usitnjenih proizvoda. Analitičkom (računskom) metodom, uz primjenu matematičkih jednačina, otkrivamo zakonitosti procesa usitnjavanja, koji uzimaju u obzir konstruktivno-tehnološke i energetske parametre ugrađene na drobilicama i rezultate ispitivanja usitnjavanja mineralne sirovine i izdrobljenih proizvoda u realnim uslovima. Grafički prikazi funkcionalnih

zavisnosti ulazno-izlaznih parametara drobilica upotpunjeni sa proračunskim provjerama ključnih pokazatelja rada drobilica omogućavaju inženjersku analizu izbora i pozicioniranje u shemi usitnjavanja uzimajući u obzir uticajne faktore i ključne performanse.

## 2. PREDSTAVLJANJE STADIJALNOSTI USITNJAVANJA

Projektni koraci u dizajniranju pogona za pripremu i predadu prirodnih i reciklabilnih materijala su: a) prethodno utvrđivanje fizičko-mehaničkih i mineraloških karakteristika materijala, b) dizajniranje sheme tehnološkog procesa sa tokovima kretanja materijala i stadijumima usitnjavanja, c) izbor procesne opreme, d) utvrđivanje učinkovitosti drobljenja i mljevenja u odnosu na kvalitet usitnjenog proizvoda kao i e) ekonomsku isplativost primjene pojedinih mašina. Zahtjevi za razbijanje stijenskih materijala i kvalitetnim granulometrijskim sastavom produkata usitnjavanja nameću potrebu drobljenja i mljevenja u više stepeni i poznavanje pripadnosti vrste drobilica i mlinova[5]. U tom pogledu potrebno je poznavati opštu podjelu usitnjavanja prema stepenima prerade, kako slijedi:

- a) *primarna prerada*[3], kojom se vrši drobljenje mineralnih sirovina krupnoće do 300(500) [mm] se usitnjavaju do veličine 70-100[mm]. Stepen usitnjavanja kod drobilica za krupono drobljenje se kreće od 1:2 do 1.6. Prerodom se dobiva oko 10-20[%] frakcija manjih od 7[mm]. Najoptimalniji izbor: čeljusna drobilica za krupno drobljenje[2].
- b) *sekundarna prerada* u kojoj se izdrobljeni materijal iz I stepena dodatno drobi i melje kako bi se dobio potreban granulometrijski sastav frakcija agregata (0-32mm). Ukoliko je sekundarni stepen prerade i konačni, prethodno treba odvojiti frakcije koje su prerađene prosijavanjem. Stepen/odnos usitnjavanja 1:3 do 1:10.
- c) *tercijarna prerada* u kojoj se postavljaju visoki zahtjevi u vezi sa granulometrijom agregata. stepen/odnos usitnjavanja 1:5 do 1:20. U ovom stadijumu suficitarne frakcije ili nekomercijalni usitnjeni proizvodi se dodatno melju i prosijavaju kako bi se dobile tržišne komercijalne frakcije.

## 3. TOKOVI RADA PO R-G METODI

### 3.1. Pristup izvođenju postupka primjene R-G metode

U postrojenjima za pripremu nemetalnih mineralnih sirovina proizvode se drobljeni prirodni agregat različitih frakcija i međufrakcija i reciklirani agregat dobijen drobljenjem otpadnih materijala.. Pripreme uzoraka i analiza rezultata ispitivanja se obavlja prema važećim tehničkim propisima, pravilima i normama. Granulometrijski sastav reprezentativnog uzorka granita sa masenom i sadržajnom raspodjelom prikazuje se dijagramski sa granulometrijskom krivom distribucije komada i zrna i formira tabela sa pokazateljima raspodjele (Tabela 1.).

### 3.2. Zadatak projekta istraživanja

Polazni parametri:

- sirovinski materijal: stijenski odminirani kamen, tvrd do srednje tvrd (granit)
- ulazna krupnoća: dgk-ggk, 0/400 [mm],  $D_{min}=0$  [mm],  $D_{max}=400$  [mm]
- asortiman proizvoda/agregati:  $d_4$  frakcija: 0/4 [mm],  $d_8$  frakcija: 4/8 [mm] i  $d_{16}$  frakcija: 8/16 [mm].
- forme zrna u proizvodu: pretežno kubična (kockasta).
- ulazni kapacitet:  $Q_u = 200$  [t/h]
- tehnološka shema odvijanja procesa pripreme: prema dobivenim rezultatima istraživanja

Tabela 1. Prikaz dobijenih vrijednosti prosijavanjem na seriji sita

Granulometrijska, sadržajna i masena raspodjela zrna ulaznog materijala	Reprezentativni uzorak								
	Proračunati kumulativni granulometrijski sastav								
	Klase krupnoće [mm]			Kumulativni sadržaj [%] $\Sigma p_i(P)$					
	$D_{\min}=0$	$D_{\max}=400$		po +			po -		
		+ 120		43			100		
		+100 - 120		48			57		
		+ 63 - 100		60			52		
		+ 31,5 - 63		72			40		
		+16 - 31,5		82			28		
		+8 - 6		87			18		
	+4 - 8		90			13			
	0 - 4		100			10			
Karakteristika $c_m$ : odminirani granit									
D <sub>80</sub> = 220 [mm]									
Klasa krupnoće, frakcija $\Sigma D_i$ [mm]	0/4	4/8	8/16	16/31,5	31,5/63	63/100	100/120	+120	0/400 [mm]
Maseni sadržaj $\Sigma p_i$ [%]	10	3	5	10	12	12	5	43	100 [%]
Količina mase $\Sigma m_i$ [t/h]	20	6	10	20	24	24	10	86	200 [t/h]
$Q_{d1} = 164$ [t/h] ili $Q_{u1} = 96$ [t/h], $Q_{u11} = 68$ [t/h], $Q_{u111} = 0$ [t/h] $Q_{up} = 36$ [t/h], $Q_j = 0$ [t/h]									

Karakteristike mineralne sirovine:

- zapreminska masa:  $\gamma = 2.66$  [t/m<sup>3</sup>];  $\gamma_n = 1.97$  [t/m<sup>3</sup>];  $\gamma_r = 1.60$  [t/m<sup>3</sup>]
- gustina:  $\rho = 2,75$  [t/m<sup>3</sup>]
- otpornost nadrobljenje:  $LosA(A) = 24$  [%]
- indeks drobljivosti:  $I_d = 35$  [%]
- čvrstoća na pritisak:  $\sigma_p = 210$  [MPa]
- pripadnost grupi tvrdoće: vrlo tvrda stijena
- koeficijent drobljivosti:  $k_{dr} = 0,85$  (I stepen),  $k_{dr} = 1,0$  (II stepen)
- faktor eksploatacionog vijeka, habajuće djelovanje:  $F_{ev} = 1,6$
- indeks obrazivnosti:  $A_i = 0,44$
- Bondov radni indeks:  $W_i = 16,70$  [kWh/t]

### 3.3. Izbor stepena drobljenja

Prema analizi odnosa krupnoće na ulazu u mašinu i veličine frakcije proizvoda u mm (0–400 → 0–16) drobljenje se nemože izvesti u jednom stepenu jer je:

- ukupan teorijski stepen drobljenja:

$$n_{uu} = \frac{D_{\max}}{d_{\max}} = \frac{400}{16} = 25, \text{ niti jedna drobilica nemože obezbijediti dati stepen drobljenja prema zadatku planiranja.}$$

- odluka o drobljenju u dva stepena, krupno i srednje drobljenje:

$$n_{sr} = n_1 \cdot n_2 = n_{sr}^2 \rightarrow n_{sr} = \sqrt{n_1 \cdot n_2} = \sqrt{25} = 5, \text{ prihvatljivo}$$

### 3.4. Preliminarni izbor drobilica po stadijumima drobljenja

Prilikom preliminarnom izboru vrste i modela drobilice u oba slučaja, korišteni su odgovarajući dijagrami kapaciteta iz prospektne dokumentacije proizvođača mašina. Elementi užeg izbora mašina po stadijumima:

I stadijum drobljenja: prema karakteristikama mineralne sirovine i prema zahtjevu ulaznih veličina izbora najpogodnija je čeljusna drobilica sa složenim kretanjem čeljusti, pogodna za drobljenje vrlo tvrdih i tvrdih i srednje tvrdih sirovina. Ima konstruktivni stepen drobljenja,  $n_{uk} = 3$  do 4. Ove drobilice, kako je vidljivo iz projektne dokumentacije proizvođača firme "Nordberg"[1], modeli serije C, konstruisane su za primarno drobljenje i imaju instalisani kapacitet,  $Q_m =$  od 50 do 1100 [t/h].

II stadijum drobljenja: predstavlja završno drobljenje, u kojem se zahtijeva odgovarajuća zastupljenost frakcija 0/4 [mm], 4/8 [mm] i 8/16 [mm] i dominirajući sadržaj zrna kubičnog oblika u konačnom proizvodu. Prema karakteristikama iz prospektne dokumentacije proizvođača "Nordberg", konusne drobilice za srednje drobljenje mogu ispuniti tražene zahtjeve. Tehnički podaci[1]: serija G, konstrukcioni stepen drobljenja,  $n_{uk} = 5-8$ , kapacitet  $Q_m =$  od 100 do 230[t/h] za tvrde i vrlo tvrde minerala. Drobe materijal neprekidno, nemaju praznog hoda, oblik zrna nakon obrade je kubičast.

Kapacitet drobljenja je ovisan od geometrijskih karakteristika konusne drobilice, ravnomjernosti doziranja, izražene preko koeficijenta doziranja ( $k_{doz} \leq 1$ ) i veličina:

$$Q_{dr} = f(KM, n_u, T_v M, k_{doz}) \text{ uz uslov da } za > n_u, > T_v M \rightarrow (slijedi) < Q_{dr}, < D_{max} \dots (1)$$

Na osnovu prethodno iznešenog usvajano je drobljenje u dva stepena:

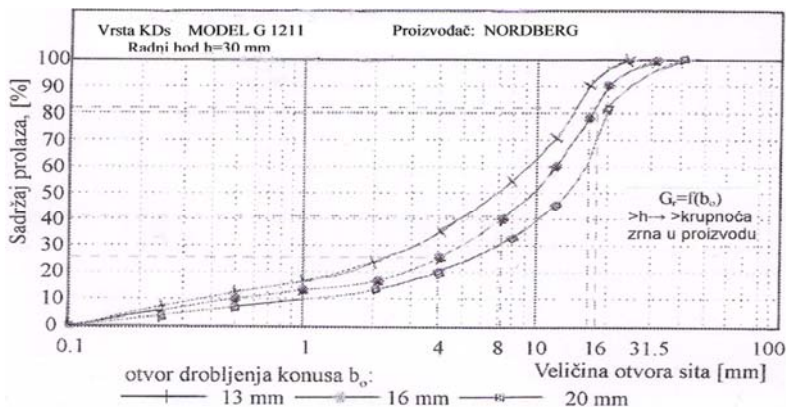
prvi stepen  $n_{ul} = 4$  drugi stepen  $n_{ull} = 6,25$  pa je:

$$n_{uk} = n_{ul} \cdot n_{ull} = 4 \cdot 6,25 = 25, \text{ zadovoljava date procesne i projektne uslove.}$$

### 3.5. Izbor i provjera parametara konusne drobilice za sekundarno (srednje) drobljenje

Procesni parametri u II stadijumu, sekundarni stepen:

- ulazna krupnoća: 16 do 100[mm], dgk/ggk,
  - raspodjela masa prema dijagramu  $G_r$  (Slika 1.):
    - a.  $Q_{up} = 17,28$ [t/h], krupnoća 0 – 16[mm]
    - b.  $Q_{ull} = 78,72$ [t/h], krupnoća +16 – 100[mm]
    - c.  $\Delta d_{bo} = d_{bo} - d_{max} = 16$ [%],
    - d.  $Q_{kr} = 28$ [t/h] prema dijagramu izdrobljenog proizvoda
  - količina mase materijala,  $Q_u = Q_{dr} + Q_{kr}$  tj.  $Q_u = 147 + 28 = 175$ [t/h].
  - analiza tehnoloških parametara:
- ✓ sa povećanjem veličine radnog udarnog hoda drobilice  $h$  dolazi do srazmjernog povećanja kapaciteta drobilice  $Q_m$  čija je funkcionalna ovisnost vidljiva kroz povećanje otvora drobljenja  $b_o$ .
- ✓ sa otvorom drobljenja  $b_o = 20$ [mm] i hodom  $h = 5$ [mm], drobilica obezbjeđuje i  $Q_m = 175$ [t/h], prospektna dokumentacija proizvođača mašine.



Slika 1. Granulometrijske krive ( $G_r$ ) izdrobljenog proizvoda sa različitim  $b_o$

Procesni zahtjevi i uslovi: zatvoren krug drobljenja, otvor drobljenja konusa  $b_o = 16$ [mm] kao ggk proizvoda, prethodno prosijavanje uz opterećenje sita od 375 [t/h],  $E_p \approx 95$ [%], ulazni otvor konusne drobilice:  $D_u = (1,5 \text{ do } 2)b_o$  ( $b_o$  čeljusne drobilice), zbog pojave pločastih i duguljastih krupnozrnih komada u usitnjenoj proizvodnji,  $D_u = 170$ [mm], zadnja mreža sita sa otvorima do 5 % većim od otvora drobljenja  $b_o = 16$ [mm].

### 3.5. Proračunska provjera protoka, raspodjele i kretanja mase materijala

Korištene matematičke formule otkrivanju zakonitosti procesa usitnjavanja uzimaju u obzir konstruktivno-tehnološke i energetske parametre drobilica od strane proizvođača mašina, rezultate drobljivosti mineralne sirovine i kvaliteta izdrobljenih proizvoda.

#### Proračunska provjera protoka, raspodjele i kretanja mase materijala

Može se obaviti kroz kontrolu bilansa stanja količina masa na osnovu granica prosijanih frakcija, tj. preko jednačine kretanja masa:

$$Q_{dr} = Q_{kr} + \left( \frac{a_1 + a_2 + a_3}{100} \right) \cdot X + \left( \frac{b_1 + b_2}{100} \right) \cdot X \cdot \left( \frac{c_1 + c_2 + c_3}{100} \right) \quad \dots(2)$$

gdje je:

$Q_{dr}$  - ukupna masa materijala za drobljenje

$Q_{kr}$  - cirkulirajuća masa materijala ili nedovoljno usitnjena masa,

$a_1, a_2, a_3$  – sadržaj frakcija u mineralnoj sirovini za II stepen drobljenja

$b_1, b_2, b_3$  – isto, samo za I stepen drobljenja,

$c_1, c_2, c_3$  – sadržaj frakcija iz I stepena za drobljenje u II stepenu

Unošenjem datih vrijednosti u formulu (2) dobijamo:

$$175 = 28 + (0,12 + 0,12 + 0,1)X + (0,43 + 0,05)X \cdot (0,30 + 0,34 + 0,18)$$

$$175 = 28 + 0,34X + 0,48 \cdot 0,82X$$

$$X = \frac{147}{0,73} = 201 [t], \text{ što odgovara ulaznoj količini } Q_u = 200 [t]$$

napomena: odstupanje od 0,5% u vrijednostima mase protoka se može prepisati greški očitavanja vrijednosti sa granulometrijskih krivi i kod zaokruživanja vrijednosti parametara.

#### Proračun parametara konusne drobilice u II stadijumu

❖ Specifična potrošnja energije na usitnjavanje

$$W = k_{dr} \cdot W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right), [kWh/t] \quad \dots(3)$$

gdje je:

$W_i = 16,70 [kWh/t]$ , eksperimentalno utvrđen radni indeks po Bondu (za granit)

$F = 80 [mm]$ ,  $D_{80} [d_{80}]$  – veličina otvora sita kroz koje prolazi 80% sirovine na ulazu, (sekundarno drobljenje)

$P = 15,8 [mm]$ ,  $d_{80}$  – veličina otvora sita kroz koje prolazi 80% izdrobljenog materijala, (sekundarno drobljenje).

$k_{dr} = 0,85$  – koeficijent drobljivosti za krupno drobljenje

$k_{dr} = 1,0$  – koeficijent drobljivosti za srednje drobljenje

Unošenjem vrijednosti u formulu (3) dobije se:

$$W = 1,0 \cdot 16,70 \left( \frac{10}{\sqrt{15,8 \cdot 10^3}} - \frac{10}{\sqrt{80 \cdot 10^3}} \right)$$

$$W = 0,737 [kWh/t]$$

❖ Potrošnja energije na usitnjavanje

$$E_w = 11 \cdot W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right), [kWh/t] \quad \dots(4)$$

$$E_w = 11 \cdot 16,70 \left( \frac{1}{\sqrt{15,8 \cdot 10^3}} - \frac{1}{\sqrt{80 \cdot 10^3}} \right),$$

$$E_w = 0,812 [kWh/t]$$

Provjera: raspon vrijednosti  $E_w$  za konusne drobilice: 0,4 do 2,2[kWh/t] prema tablicama  $E_w$ .

❖ Izračunavanje i provjera kapaciteta i snage konusne drobilice

- zapreminski kapacitet konusne drobilice:

$$Q_{dr(z)} = 60 \cdot \pi \cdot n_c \cdot b \cdot l \cdot D_k, [\text{m}^3/\text{h}] \quad \dots(5)$$

gdje je:

$$n_c = 350 \text{ [}^\circ/\text{min]}$$

$$b = 46 \text{ [mm] ili } 0,046 \text{ [m]}$$

$$l = 48 \text{ [mm] ili } 0,048 \text{ [m]}$$

$$D_k = 780 \text{ [mm] ili } 0,78 \text{ [m]}$$

$$k_r = 0,60 \text{ - koeficijent rastresitosti materijala u drobilici, (0,25 - 0,75)}$$

pa je:  $Q_{m(z)} = 60 \cdot 3,14 \cdot 350 \cdot 0,046 \cdot 0,048 \cdot 0,78 = 113,56 \text{ [m}^3/\text{h]}$

- maseni kapacitet drobilice (mašine):

$$Q_{dr(m)} = k_r \cdot \rho \cdot Q_{dr(z)}, [\text{t/h}]$$

pa je:  $Q_{dr(m)} = 0,60 \cdot 2,75 \cdot 113,56 = 187,37, [\text{t/h}]$

- proračun snage drobilice:

$$P = E_w \cdot Q_{dr(m)} = 0,812 \cdot 187,37 = 152,15 [\text{kW}]$$

Optimalna rješenja drobljenja data kroz uslove: produktivnosti ( $_{\max}Q_{pr}$ ), stepena usitnjavanja ( $_{\max}n_u$ ) i otvora drobljenja ( $_{opt}b_o$ ), mogu se dobiti višestrukim izvođenjem ciljanih promjena elemenata režima rada kao što su: radni hod, kapacitet, snaga, otvor drobljenja, krupnoća, ulazni izlazni otvori i sl.[4], prema procesnim zahtjevima i zadacima projekta dizajniranja sheme procesa..

Na sličan metodološki postupak izvršena je računaska i grafička analiza izbora parametara čeljusne drobilice u I stadijumu drobljenja koja nije predmet ovog rada.

#### 4. ZAKLJUČAK O PRIMJENI R-G METODE

Grafički prikazane i postavljene funkcionalne zavisnosti ulazno-izlaznih parametara, dobivenim serijom promjena ključnih parametara u odnosima sirovina-mašina računskim putem, simulacijom rada po shemi tokova procesa kao i od strane proizvođača mašina po izvršenim testiranjima, omogućavaju inženjersku analizu izbora pozicije drobilica i mlinova, uzimajući u obzir rezultate izvršenih provjera. Metodološki postupak se može primijeniti i za izbor drugih konstrukcionih izvedbi mašina za usitnjavanje, koristeći odgovarajuće ulazne parametre, dokumentaciju proizvođača, formule i grafičke prikaze.

#### 5. REFERENCE

- [1] „Nordberg - Lokomo Oy“, Nordberg Crushing Process Planning, Tampere, Finland, 1992-1995.
- [2] Korman, T., Bedeković, G., Kujundžić, T., Kuhinek, D.: Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2014.
- [3] Salopek, B., Bedeković, G.: Sitnjenje: Prvi stupanj u oplemenjivanju mineralnih sirovina. U: Rudarsko Geološko Naftni zbornik vol. 12. Zagreb: Rudarskogeološkonaftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2000., str. 83-88.
- [4] Šišić, I.; Sredojević, J.; Rekanović, S.: „Istraživanje modaliteta ocjene produktivnosti drobilica izborom ključnih parametara“ 9. NSS sa međunarodnim učešćem ”QUALITY 2015”, Neum, B&H, 10.–13. VI 2015. Zbornik radova ISSN 1512-9268.
- [5] Wills, B.A.: Wills' Mineral Processing Technology, 8th Edition, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery Oxford: Elsevier, 2016.