

ISTRAŽIVANJE MODALITETA OCJENE PRODUKTIVNOSTI DROBILICA IZBOROM KLJUČNIH PARAMETARA

RESEARCH OF MODALITIES OF PRODUCTIVITY ASSESSMENT FOR CRUSHERS BY SELECTING KEY PARAMETERS

dr. sc. Ifet Šišić, van. profesor
mr. sc. Sebila Rekanović, viši asistent
Univerzitet u Bihaću, Bihać BiH

dr. sc. Jovan Sredojević, red. profesor
Univerzitet u Zenici, Zenica BiH

REZIME

Kod ocjene drobilice primjenjuju se metodološki postupci koji se prevashodno odnose na dokazivanje kapaciteta i učinkovitost drobljenja u realnim uslovima. Posebna pažnja se posvećuje konstruktivnoj otpornosti ugrađenih materijala na habanje radnih organa kao i ostalih sklopova za zahvatanje i guranje materijala u odnosu na mehaničke karakteristike materijala i zahtijevani izlazni kvalitet usitnjenog proizvoda. Povećana ponuda različitih modela drobilica od strane svjetskih proizvođača otežava postupak izbora i ocjene, naročito sa aspekta instalisanog kapaciteta prerade, primjenjene metode drobljenja i mehaničke otpornosti sirovina na drobljenje. Pogreške u ocjeni i izboru drobilice mogu prouzrokovati povećane investicione izdatke kao i znatne troškove održavanja.

Ključne riječi: drobilica, modalitet, ocjena, produktivnost

SUMMARY

In assessment of the crusher methodological procedures are applied which primarily relate to demonstrate capacity and efficiency of fragmentation in real conditions. Special attention is given to structural resistance of incorporated materials to abrasion of working parts as well as of other circuits for grasping and pushing material in relation to the mechanical characteristics of materials and the required output quality of chopped products. Increased offer of different models of crushers by their manufacturers from all over the world complicates the procedure of election and assessment, especially in terms of installed capacity of processing, applied method of crushing and mechanical resistance of raw materials to crushing. Errors in evaluation and selection of crusher can cause high investment expense as well as major maintenance costs.

Keywords: crusher, modality, assessment, productivity

1. UVOD

U mnogim pogonima prerade nemetalnih sirovina pretežno se u primarnom stepenu drobljenja nalaze čeljusne drobilice (ČD), ili udarne drobilice sa gredama(UDg), koja spoznaja omogućava postavljanje odgovarajućih modela ocjene ovih vrsta mašina u odnosu na karakteristike mineralnih sirovina, procesa usitnjavanja i kvaliteta usitnjenog proizvoda.

2. ISTRAŽIVANJE MODALITETA OCJENE

Pojam „modaliteta“ možemo opisati kao mogućnost, stvarnost i nužnost, tj. put i način na koji nešto postoji, zbiva se ili zamišlja. Spoznaja, da se funkcionalno povezani i ovisni ulazno-

izlazni parametri, sa jednom, dvije i tri promjenljive veličine mogu identificirati kod svih vrsta mašina za usitnjavanje. Proizvodnu funkciju usitnjavanja materijala možemo izraziti kao matematičku formulaciju odnosa i međusobnih ovisnosti karakterističnih veličina mašina preko funkcije regresije izražene preko regresijskog modela. Dati pristup zahtijeva određivanje funkcionalnih veza između jedne zavisno promjenljive veličine y i jedne ili više nezavisno promjenljivih veličina x i koristi se u slučajevima kada su mjerenja fizičkih veličina ocjene drobitosti otežana, skupa ili neizvodiva[3].

$$y = f(x_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots(1)$$

Funkcija produktivnosti drobitosti po podskupovima varijabilnih veličina izgleda ovako:

$$Q_{pr} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$Q_{pr} = [f(KMS), f(KKM), f(TKM), f(E_nKM)] \quad \dots(2)$$

Na osnovu date identifikacije pokazatelja moguće je ocijeniti i izabrati onu mašinu koja daje najbolje efekte usitnjavanja prema limitiranim kriterijumima pokazatelja ocjene, Q_{pr} na izlazu iz mašine u vremenu t (tabela 1 dio I), kao funkcionalna ovisnost od:

- ✓ pokazatelj $n_u = f(D_{max}/d_{max}, B_u, b_o, h, n_v/n_\varepsilon/n_r)$, stepen usitnjavanja
- ✓ pokazatelj $G_r = f(b_o, n_v/n_\varepsilon/n_r, D_{max}/D_{min}, d_{max}/d_{min}, \sum d_i, \Delta d_s(b_o))$, gran. sastav
- ✓ pokazatelj $M_z = f(MeU, n_v/n_\varepsilon/n_r, TvM)$, oblik zrna
- ✓ pokazatelj $W = f(W_i, Q_{dr}, n_v/n_\varepsilon/n_r, TvM, D_{80}/d_{80}, n_u)$, Bond-ov radni index
- ✓ pokazatelj $E_w = f(n_v/n_\varepsilon/n_r, P, D_{max}/D_{min}, d_{max}/d_{min}, D_{80}/d_{80}, n_u)$, potrošnja energije
- ✓ pokazatelj $T_{rm} = f(T_{re}, H_{de}, T_{zd}, T_{ro}, T_{rost})$, troškovi rada mašine

Po osnovama postavljenih odnosa i kretanja ključnih pokazatelja, produktivnost drobitosti Q_{pr} ima sljedeće funkcionalno ovisne relacije:

$$\begin{aligned} >Q_{pr} \rightarrow >B_u, >D_{max}, >P, >W, >H_{de}, >\%d_s, >Q_u \rightarrow \\ &\rightarrow <n_v/n_\varepsilon/n_r, <n_u \rightarrow <TvM, >\rho \rightarrow >k_f, >k, >p \end{aligned} \quad \dots(3)$$

Tabela 1. Odabrani ključni parametri iz skupova karakteristika mašina

I Parametri iz skupa karakteristika drobitosti							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ čeljusna drobitica (ČD) $Q_{pr} = f[L_u \times B_u(b, b_o, h), n_v, P, (L_i \times b_j), \rho, m_d]$ ▪ konusna drobitica (KD) $Q_{pr} = f[D_e, n_\varepsilon, (b, b_o, h), P, D_k, \rho]$ ▪ udarna drobitica (UDg) $Q_{pr} = f[B_e, n_r, D_r, L_r, (b_i, b_o), P, \rho]$ 				<ul style="list-style-type: none"> ▪ drobitica sa valjcima (VD) $Q_{pr} = f[B_e, (b_o), D_v, L_v, n_v(v_r), P, \rho]$ ▪ vertikalna udarna drobitica (VSI) $Q_{pr} = f[D_e, D_r, h_r, n_r, P, (n_Sr), \rho]$ ▪ mlinovi za krupno mljevenje (M) $Q_{pr} = f(V_k, \square \text{ kugle ili šipke}, b_o, D_v, L_v, n_m, P, \rho]$ 			
II Zahtjevi po zadacima istraživanja ocjene drobitosti							
Parametar	$D_{min} - D_{max}$ ulazna krupnoća	Q_{dr} kapaciteti drobljenja	SD stadiji drobljenja	k_{dr} koeficijent drobitosti	d_{gk-ggk} granice krupnoće	n_u $n_m = \frac{ggk}{d_{gk}}$	d_i asortiman klasa
Veličina	mm	t/h			mm		proizvodi
III Skupovi parametara mašina za drobljenje							
Konstruktivni parametri		Tehnološki parametri		Energetski parametri		Procesni pokazatelji	
ČD	UDg	ČD	UDg	ČD	UDg	ČD	UDg
$L_u \times B_u, L_i \times b, H_\varepsilon, L_u \times B_u, D_r, L_r$	$L_u \times B_u, D_r, L_r$	Q_m, n_v, m_k	Q_m, n_r	P, W, E_w	Q_u, D_{max}, d_{max}		
$V_k, \Delta b_0, m_d$	$\Delta b_0, m_r, m_d$	h, b_0, b	b_0, b_1	$\eta, \cos \varphi$	n_m, n_w, d_{b_0}		
Značenje oznaka: ČD–čeljusna drobitica, KD–konusna drobitica, UDg–udarna drobitica sa gerdama, VD–drobitica sa valjcima, VSI–udarna vertikalna drobitica, M–mlin za mljevenje; L_u, B_u, H_ε –dužina, širina i visina ulaznog otvora, D_r, L_r –prečnik i dužina rotora; V_k –zapremina komore, b_0/b –izlazni otvori drobljenja, m_d, m_r –masa drobitice i masa rotora; P –instalirana snaga, W –mehanički rad usitnjavanja; E_w –količina energije za drobljenje; $n_r/n_v/v_r$ –broj obrtaja ili brzina rotora ili valjaka, η –stepen korisnog dejstva elektromotora, $\cos \varphi$ –faktor snage elektromotora.							

Kod izbora adekvatnog modaliteta ocjene drobilica važno je selektirati i vrednovati ključne promjenljive i stalne parametre iz skupa konstruktivnih (KKM), tehnoloških (TKM), energetskih (E_n KM) karakteristika mašina i karakteristika sirovine (KMS) u odnosu na kvalitet proizvoda drobljenja (KP_d), preko kojih možemo ocijeniti njihov rad kao i postaviti optimalne uslove procesa drobljenja (tabela 1).

3. PREDSTAVLJANJE ISTRAŽENIH MODALITETA

3.1. Modalitet izbora i ocjene br. 1

U okvirima jednog modela od jedne vrste drobilica imamo stalne i ulazno-izlazne promjenljive veličine. Čeljusne drobilice (ČD) → stalne veličine: $L_u \times B_u, n_v, P, H_c, m_k, m_d$, → promjenljive veličine: $b_o, h, b, D_{max}, Q_{pr}$. Prema usvojenom kriterijumu: $F_k = \max[Q_{pr}]$, kao izlazna veličina, matematičko modeliranje produktivnosti drobljenja mašine može se izvesti prema slijedećim odabranim parametrima iz skupova karakteristika i preko reduciranog jednodimenzionalnog ili dvodimenzionalnog modela oblika:

$$Q_m = f(b_o) \text{ ili } Q_m = f(b_o, D_{max}) \dots (4)$$

Veličine koje se mogu dobiti računskim putem: otvor pražnjenja $b = b_o + h$ [mm], radni hod $h \cong 7+0,1b_o$ [mm], najveća veličina zrna na ulazu $D_{max} = 0,85 \cdot B_u$ [mm].

3.2. Modalitet izbora i ocjene br. 2

U okvirima više modela od jedne vrste drobilice dolazi do promjena stalnih i svih ulazno-izlaznih veličina, sa povećanjima ili smanjenjima veličina unutar jedne vrste drobilice, u odnosu na modalitet br.1., pri čemu se u nastavku mogu postaviti matematički modeli iz kojih proizilaze modeliranja mašina prema ključnim parametrima i po modelu: izbor → ocjena → optimizacija, tj.:

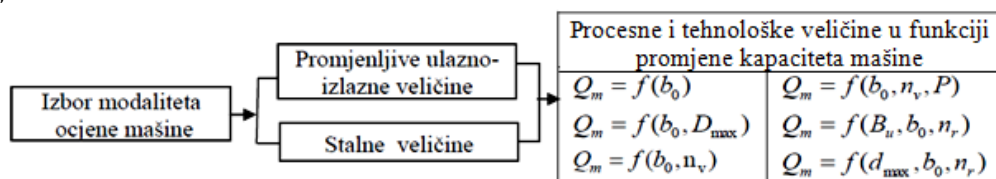
- ČD, čeljusna drobilica: kapacitet $Q_m = f(b_o, n_v)$ ili $Q_m = f(b_o, n_v, P)$

$$\text{ili } Q_m = f(b_o, n_v, H_c) \text{ ili } Q_m = f(d_{max}, b_o, n_v) \dots (5)$$

Konstruktivni stepen usitnjavanja preko ulaznog i izlaznog otvora drobljenja b i b_o je: $n_k = 0,85B_u/b, n_k = 0,85B_u/b_o, n_k = D_{max}/d_{nom}$.

3.3. Modalitet izbora i ocjene br. 3

U okvirima više modela od više vrsta drobilica, jednog ili od više proizvođača, nužno je identificirati zajedničke ulazno-izlazne parametre i kao takve svoditi na modeliranje prema modalitetu br.1 ili br. 2, jer u suprotnome modeliranje može biti kompleksno[2]. Shematski prikaz ocjene kapaciteta drobilica u funkciji stalnih i ulazno-izlaznih promjenljivih veličina je dat na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz ocjene kapaciteta drobilica u funkciji stalnih i promjenljivih veličina

3.4. Izbor reduciranog modela na primjeru čeljusne drobilice ČD

Eksperimentalni matematički model predstavlja polinomsku funkcija sa odgovarajućim koeficijentima modela. Sa porastom broja parametarskih veličina (x_i) broj jednačina i broj eksperimenata se znatno uvećava, zbog čega se usvaja polinomski oblik matematičkog modeliranja I

reda. On aproksimira problem ovisnosti produktivnosti ili kapaciteta drobljenja mašine od ključnih parametara b_o i n_v (x_1 i x_2) sa koeficijentima b_i .

- matematički model oblika: $Q_m = C \cdot b_o^{b_1} \cdot n_v^{b_2}$ nakon logaritmiranja ima oblik:

$$\ln Q_m = \ln C + b_1 \cdot \ln b_o + b_2 \cdot \ln n_v, \text{ linearni oblik} \quad \dots(6)$$

$$y = b_o + b_1 x_1 + b_2 x_2, \text{ polinomski oblik} \quad \dots(7)$$

Funkcionalnost veza i ovisnost ulazno-izlaznih parametara sa jednom, dvije i tri promjenljive veličine, se mogu utvrditi i postaviti kod svih vrsta mašina (modalitet 2).

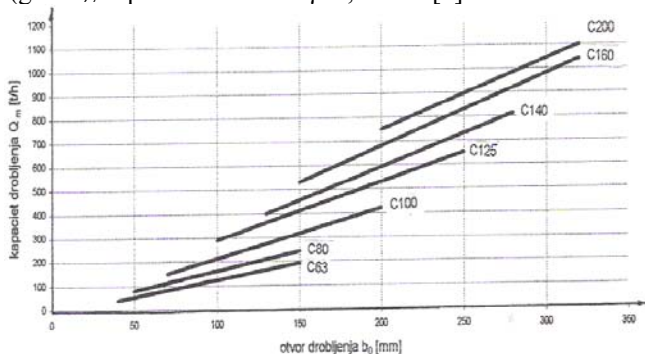
U tabeli 2 data je matrica plana varijabli, kao podloga za izbor reduciranog modela ključnih parametara modeliranja Q_m :

$$Y = Q_m = f(b_o, n_v) \dots(8)$$

Tabela 2. Matrica plana varijabli različitih modela čeljusne drobilice Tip C Nordberg[5]

Mjereni veličina Q_m [t/h]		Broj obrtaja vratila n_v [o/min] fizikalna varijabla									
		$n_v=200$	$n_v=220$	$n_v=220$	$n_v=220$	$n_v=220$	$n_v=230$	$n_v=300$	$n_v=260$	$n_v=350$	$n_v=340$
Rasporni izlaznog otvora drobljenja b_o [mm] fizikalna veličina	40									65	40
	50									80	55
	60									95	65
	70						190	155	150	115	80
	80						210	175	170	130	95
	90						235	200	190	150	110
	100					290	255	220	215	165	120
	125			400	385	350	310	280	265	210	
	150		520	470	455	410	370	335	315	250	
	175	760	595	540	520	470	425	390	370	290	
	200	855	675	610	590	530	480	445	420		
	225	945	750	680	655	590					
	250	1040	825	750	725	650					
275	1130	900	820								
300	1225	980									

Ekstremni slučajevi: $\max Q_m$ ne znači da drobilica može dati potpuni kvalitet usitnjenog proizvoda, dok $\min Q_m$ pokazuje nedovoljnu tehničko-tehnološku i ekonomsku iskorištenost. Obzirom da čeljusne drobilice ne daju finalni proizvod za tržište (u većini slučajeva) kod ocjene veću pažnju treba posvetiti produktivnosti i troškovima rada. Na slici 2 kao rezultat matematičkog modeliranja, $Q_m=f(b_o)$, dat je grafički prikaz kapaciteta drobljenja čeljusne drobilice Tip C, Nordberg: otvor drobljenja $b_o = 40 \div 320$ [mm], tvrda mineralna sirovina (granit), zapreminske mase $\gamma=1,60 \text{ t/m}^3$ [4].



Čeljusna drobilica Tip C „Nordberg“



Slika 2. Dijagram kapaciteta drobljenja čeljusne drobilice Tip C, otvor drobljenja, $b_o=40 \div 320$ [mm]

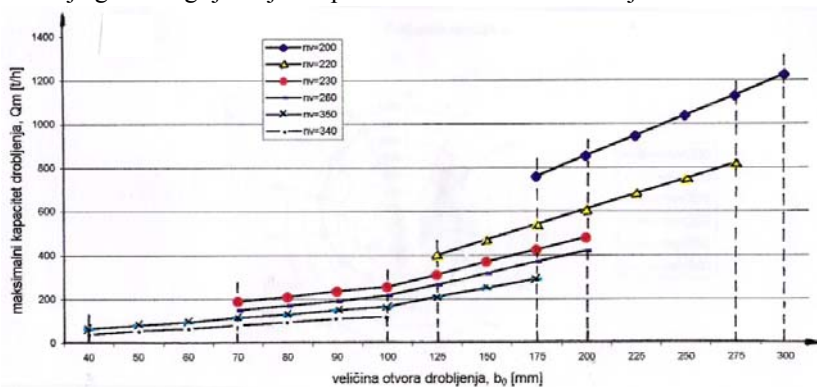
Jednačine promjene kapaciteta drobljenja drobilica $Q_m=f(n_v)$, date su kroz linearne ovisnosti sa vrijednostima koeficijenata linearne funkcije:

$$y = b_0 + b_1 x \quad \dots\dots(9)$$

Jednačine imaju oblik:

$$\left. \begin{aligned} n_v = 200 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 3,7086 b_0 + 111,71 \\ n_v = 220 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 2,80 b_0 + 5,00 \\ n_v = 230 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 2,2442 b_0 + 31,655 \\ n_v = 260 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 2,0827 b_0 + 4,1367 \\ n_v = 300 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 2,2303 b_0 - 11,209 \\ n_v = 340 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 1,3571 b_0 - 14,286 \\ n_v = 350 \left[\frac{\text{v}}{\text{min}} \right] &\rightarrow Q_m = 1,6895 b_0 - 3,8165 \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

Aproksimacija grafičkog rješenja eksperimentalnih veličina data je na slici 3.



Slika 3. Aproksimacija grafičkog rješenja eksperimentalnih veličina $Q_m=f(b_0, n_v)$

Istraživanjem dobiveni eksperimentalni matematički model predstavlja polinomsku funkcija sa odgovarajućim koeficijentima modela. Sa porastom broja parametarskih veličina (x_i) broj jednačina i broj eksperimenata se znatno uvećava, zbog čega se usvaja polinomski oblik matematičkog modeliranja I reda. On aproksimira problem ovisnosti kapaciteta drobljenja mašine od ključnih parametara b_0 i n_v (x_1 i x_2) sa koeficijentima b_i .

▶ matematički model oblika $Q_m = C \cdot b_0^{b_1} \cdot n_v^{b_2}$ nakon logaritmiranja ima oblik:

$$\ln Q_m = \ln C + b_1 \cdot \ln b_0 + b_2 \cdot \ln n_v, \text{ linearni oblik} \quad \dots\dots(11)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \text{ polinomski oblik} \quad \dots\dots(12)$$

Računarskom operacijom dobiven je eksperimentalni matematički model:

$$Q_m = 3,41233 \cdot b_0 - 1,40318 \cdot n_v + 291,23 \quad \dots\dots(13)$$

Koeficijent korelacije ili uzajamne zavisnosti iznosi: 0,955781.

Grafički prikaz ovisnosti kapaciteta drobljenja za različite vrijednosti otvora drobljenja i broja obrtaja vratila u funkciji elemenata režima rada (slika 4).

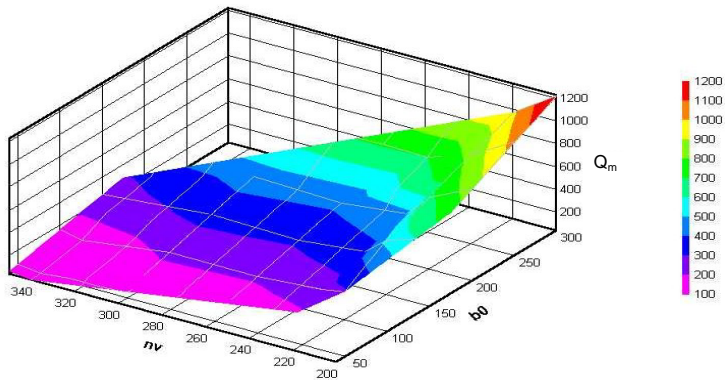
▶ modeliranje polinomskom funkcijom tipa parabole trećeg reda:

$$y = f(x_i); y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 \quad \dots\dots(14)$$

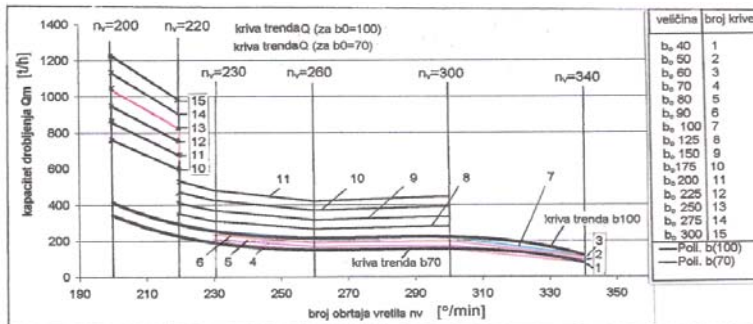
Računarskom operacijom dobiven je eksperimentalni matematički model (slika 5): $Q_m = f(n_v)$

$$\text{za } b_0=70 \text{ [mm]} \rightarrow Q_m = 9217,5 - 97,708 \cdot n_v + 0,35 \cdot n_v^2 - 0,000415 \cdot n_v^3 \quad \dots\dots(15)$$

$$\text{za } b_0=100 \text{ [mm]} \rightarrow Q_m = 10319 - 109,9 \cdot n_v + 0,3974 \cdot n_v^2 - 0,0004785 \cdot n_v^3 \quad \dots\dots(16)$$



Slika 4. Površinski grafikon za vrijednosti $Q_m = f(b_o, n_v)$ u 3D efektu



Slika 5. Aproximacija matematičkog modela produktivnosti Q_m ČD-a za $b_o = 70$ i 100 [mm] u segmentu $n_v = 200 \div 340$ [°/min]

4. ZAKLJUČAK

Produktivnost drobljenja Q_m je uzeta kao osnovni (izlazni) pokazatelj rada drobilica na osnovu koje se mogu sagledati materijalne sposobnosti, učinci, konstrukciona i proizvodna dizajniranost mašine. U istraživanju matematičkog modela produktivnosti ključno pitanje je: „Koliko odabrani matematički model adekvatno opisuje proces drobljenja“?, obzirom da su svi veći svjetski proizvođači mašina za usitnjavanje konstruktivno prilagodili svoje proizvode kao tehničke sisteme, procesnim i karakteristikama mineralnim sirovinama. Po zadatku modeliranja a prema dobivenim matematičkim jednačinama, aproksimativnim grafičkim prikazima i usvojenim kriterijumima pokazatelja ocjene, može se izvršiti izbor vrste i modela (tipa) drobilice kao i njena stadijumska pozicija u tehnološkoj shemi procesa.

5. LITERATURA

- [1] Ocepak D., Mehanska procesna tehnika, Univeza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslavlje in tehnologijo v Ljubljani, Ljubljana 1985. godine,
- [2] Jurković M., Matematičko modeliranje inženjerskih procesa i sistema, Tehnički fakultet u Bihaću, Bihać 1999. godine,
- [3] Andrijić S., Matematički modeli i metode programiranja u gospodarskom društvu, Synopsis Zagreb, Zagreb-Sarajevo 2002. godine,
- [4] [http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_segments.nsf/WebWID/WTB-081028-2256F-9D8C1/\\$File/Crushing%20Process%20Planning.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_segments.nsf/WebWID/WTB-081028-2256F-9D8C1/$File/Crushing%20Process%20Planning.pdf) (2015)
- [5] <http://www.tracsa.com.mx/fichas-tecnicas/metso-nordberg-serie-c.pdf> (2015)