

Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidruličnih bagera na površinskim kopovima uglja

Stevan Đenadić, Predrag Jovančić, Dragan Ignjatović, Filip Miletić, Ivan Janković



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidruličnih bagera na površinskim kopovima uglja | Stevan Đenadić, Predrag Jovančić, Dragan Ignjatović, Filip Miletić, Ivan Janković | Tehnika | 2019 | |

10.5937/tehnika1903369D

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0005608>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: www.dr.rgf.bg.ac.rs

Analiza primene višekriterijumskih metoda u optimizaciji izbora hidrauličnih bagera na površinskim kopovima uglja

STEVAN P. ĐENADIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

PREDRAG D. JOVANČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

DRAGAN M. IGNJATOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

FILIP M. MILETIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

IVAN V. JANKOVIĆ, Ministarstvo rudarstva i energetike, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 622.271.5

621.879.45

DOI:10.5937/tehnika1903369D

Hidraulični bageri primenjuju se u različitim oblastima privrede a najzastupljeniji su u građevinarstvu i rudarstvu. Na površinskim kopovima sa kontinualnim sistemima, klasifikuju se kao pomoćna mehanizacija a na površinskim kopovima sa diskontinualnim sistemima, kao osnovna mehanizacija. Kako je u oba slučaja njihova primena neizostavna, važno je izvršiti adekvatnu analizu postojećih podataka, u cilju optimizacije izbora tipa hidrauličnog bagera u odnosu na uslove rada datog površinskog kopa. U radu su opisane različite višekriterijumske metode koje su korišćene za analizu hidrauličnih bagera. Ukazano je na prednosti i nedostatke ovih metoda, kao i na kvalitet izlaznih informacija koje one daju a koje mogu značajno da utiču na donošenje budućih odluka pri nabavci ovih mašina.

Ključne reči: višekriterijumske metode, površinski kop uglja, pomoćna mehanizacija, hidraulični bager

1. UVOD

Primena hidrauličnih bagera je neophodna, bilo da je reč o malom ili velikom površinskom kopu. Na malim površinskim kopovima, hidraulični bageri su mehanizacija kojom se otkopava i utovara mineralna sirovina ili jalovina u transportna sredstva. Na velikim površinskim kopovima, kakav je i površinski kop razmatran u ovom radu, oni učestvuju u pomoćnim poslovima. Osnovni cilj svakog tehničkog sistema je visok nivo bezbednosti ljudi i opreme i nesmetan rad mehanizacije. Radi stvaranja uslova za bezbedno vremensko i kapacitetno iskorišćenje osnovne mehanizacije neophodno je izvršiti blagovremeno i kvalitetno sve unapred definisane pomoćne poslove na površinskom kopu. Kako svaka nabavka nove opreme predstavlja veliko investiciono ulaganje, odluke koje se donose moraju biti optimizovane prema konkretnim uslovima razmatrane sredine.

Adresa autora: Stevan Đenadić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7

e-mail: stevan.djenadic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 07.03.2019.

Rad prihvaćen: 05.04.2019.

U takvim okolnostima, višekriterijumsko odlučivanje neće dati besprekorno rešenje razmatrane odluke ali ipak može biti od značajne koristi. Naime, višekriterijumske metode omogućuju svođenje vrednosti koje su međusobno teško merljive na zajedničke činioce. Ovaj rad upravo ima za cilj da prikaže rezultate primene više različitih višekriterijumskih metoda odlučivanja u oblasti rudarstva, pri izboru hidrauličnih bagera.

2. HIDRAULIČNI BAGERI

Savremeni hidraulični bageri razvijeni su usavršavanjem klasičnih bagera kašikara. Sadrže složene elektro i hidrauličke sisteme, kao i precizno izrađene izdržljive konstrukcijske komponente [1]. Primenjuju se na površinskim kopovima uglja, kamena i ostalih metalnih i nemetalnih mineralnih sirovina. Svrstavaju se u mehanizaciju sa diskontinualnim procesom rada, koji se sastoji od ciklusa aktivnog rada (otkopavanja) i ciklusa okretanja mašine ka i od transportnog sredstva ili mesta odlaganja materijala. Poslednjih godina hidraulični bageri imaju sve veću primenu na velikim površinskim kopovima sa kontinualnim dejstvom sistema u svojstvu pomoćne mehanizacije, ili

na manjim površinskim kopovima u svojstvu osnovne mehanizacije.

Na površinskim kopovima sa kontinualnim radnim procesom, hidraulični bageri se koriste za izradu i održavanje kanala za odvodnjavanje; otkopavanje i utovar materijala; čišćenje terena; čišćenje materijala oko tračanog transportera; otkopavanje rupa za ankere i stubove; rušenje objekata; vađenje panjeva i sl.

Klasifikuju se na osnovu:

- vrste transportnog uređaja (gusenični ili pneumatični);
- stepena okretanja platforme (neokretni, delimično okretni i potpuno okretni - 360°);
- vrste pogonskog motora (sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem, sa elektromotorom);
- zapremine kašike (male, srednje ili velike zapremine); i
- visine pritiska hidrosistema (sa niskim pritiskom - do 100 bara, sa srednjim pritiskom od 100 do 300 bara, i sa visokim pritiskom - preko 300 bara) [2].

Analizirani su površinski kopovi RB Kolubara na kojima radi oko 300 „teških“ pomoćnih mašina, među kojima je, na osnovu podataka iz januara 2018. godine, 36 hidrauličnih bagera [3].

Proizvođač, tip, godina proizvodnje i brojno stanje hidrauličnih bagera koji rade na RB Kolubara, navedeni su u tabeli 1. Za dalju analizu uzeti su u obzir samo hidraulični bageri proizvođača 14. Oktobar, Caterpillar i New Holland.

Tabela 1. Hidraulični bageri koji rade u RB Kolubara

Proizvođač	Oznaka	Brojno stanje	%
14 Oktobar	BGH 1000 RH	1	2,8
14 Oktobar	BGH 1000 G	4	11,1
Caterpillar	323 DLH	3	8,4
New Holland	E215 B	10	27,8
Case	CX 210 B	7	19,4
Case	CX 210 D	4	11,1
14 Oktobar	BGH 250 ST	2	5,5
Radoje Dakić	G 700 LC	1	2,8
Hidromek	HMK 220 LC	4	11,1
Ukupno:		36	100

3. PARAMETRI ANALIZE

Predstojeća analiza mašine obuhvata najvažnije parametre koji u najvećoj meri karakterišu trenutne mogućnosti mašina, kao i buduća očekivanja mašina. Analiza obuhvata 12 osnovnih parametara, koji su navedeni u tabeli 2.

Tabela 2. Parametri analize

Tehnički parametri	Snaga motora
	Sila kopanja
	Maksimalna dubina kopanja
	Pritisak u hidrosistemu
Ekonomski parametri	Troškovi nabavke
	Operativni troškovi
Eksploatacioni parametri	Prosek moto sati godišnje
	Tehnička raspoloživost
	Prosek intervencija
Ekološki parametri	Emisioni standard
Ergonomski parametri	Lakoća održavanja
	Udobnost upravljanja

Snaga motora, sila kopanja, maksimalna dubina kopanja i pritisak u hidrosistemu su „tehnički parametri“ mašine. Definiše ih sam proizvođač opreme u okviru svog projektovanja mašina. Navedeni parametri karakterišu mogućnosti rada mašine kako u nominalnim, tako i u otežanim radnim uslovima. [4]

Troškovi nabavke i operativni troškovi su „parametri ekonomskog karaktera“ i pokazatelj su uspešnosti rada kako čitavog površinskog kopa, tako i opreme i mašina koji rade u njemu.

Najznačajniji „eksploatacioni parametri“ rada hidrauličnih bagera su prosek moto sati godišnje, tehnička raspoloživost i prosek intervencija održavanja na 1.000 mh. To su parametri koji pokazuju trenutno stanje mašina, istorijat njenog rada, kao i trend aktivnosti u radu i održavanju tih mašina.

Emisioni standard je parametar koji pokazuje koji je „ekološki standard“ zadovoljen od strane proizvođača opreme. Američki (US emission standards, Tier 1 – Tier 4) i Evropski (EU emission, Stage I – Stage IV) su najreferentniji i najprihvatljiviji standardi za ocenjivanje ekološkog uticaja motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Elementi koje Američki standard definiše su: CO_x, HC, NMHC + NO_x, NO_x, PM; Evropski standard definiše sadržaj: CO_x, HC, NO_x, PM [5].

Lakoća održavanja i udobnost upravljanja su pokazatelji koji utiču direktno na ljude koji su u stalnom, svakodnevnom kontaktu sa mašinom. Lakoća održavanja utiče na vraćanje mašine iz stanja u otkazu u stanje radne sposobnosti [6]. Raspored sklopova na mašini, masa elemenata koji se menjaju, stepen korozije, neophodnost radionice i posebnih alata, neki su od faktora koji utiču na ovaj parametar.

Udobnost upravljanja je parametar koji se definiše: kvalitetom rasporeda kontrolnih mehanizama, preglednosti kako u dnevnom tako i u noćnim uslovima rada i sl. Može se reći da su to radni uslovi koji mogu uticati i na bezbednost ljudstva. Radi definisanja ovih parametara sprovedena je ekspertska anketa osoblja koje

radi i održava razmatrane mašine. Anketa sadrži pitanja na koje je tehničko osoblje sa održavanja i upravljanja mašinama odgovaralo u intervalu od 1 do 10.

Sve vrednosti prethodno definisanih parametara proračunate su i prikazane u tabeli 3. U nastavku rada, definisane vrednosti predstavljaju ulazne podatke za međusobno vrednovanje i ocenjivanje razmatranih hidrauličnih bagera. Cilj primene višekriterijumskih metoda je da prikažu najpogodniji izbor mašine kao numeričku vrednost rezultata primene matematičkih modela, za konkretne uslove na Rudarskom basenu Kolubara.

Tabela 3. Vrednosti parametara hidrauličnih bagera

Parametri analize	14 Oktobar BGH1000G	Caterpillar 323 DLH	New Holland E215B
Snaga motora, kW	125	110	112
Sila kopanja, kN	127	141	154
Maks. dubina kopanja, m	7,00	6,73	7,08
Pritisak hidrosistema, MPa	35,0	36,0	34,3
Troškovi nabavke, €/mh	12,3	10,3	8,0
Operativni troškovi, €/mh	19,5	20,9	19,0
Moto sati godišnje, mh	1233	1807	1921
Tehnička raspoloživost	0,614	0,883	0,813
Prosek intervencija	4,53	2,95	3,4
Emisioni standard	Tier 2	Tier 4	Tier 3
Lakoća održavanja	5,5	8,4	8,2
Udobnost upravljanja	7,1	9,6	8,5

4. VIŠEKRITERIJUMSKE METODE

Višekriterijumska analiza odlučivanja (Multi Criteria Decision Analysis - MCDA) je jedna od najznačajnijih oblasti operacionih istraživanja koja je veoma brzo napredovala u poslednjih 20 godina [7]. Višekriterijumsko odlučivanje razmatra situacije u kojima donosilac odluke mora da izabere jednu od alternativa iz skupa dostupnih alternativa koje se ocenjuju na osnovu većeg broja kriterijuma.

Osnovni cilj donosioca odluke, prilikom primene višekriterijumskih metoda je dobijanje kvalitetne izlazne informacije koja može značajno uticati na strategiju planiranja budućih nabavki mehanizacije i doprineti uspešnom poslovanju u kompleksnoj oblasti kao što je rudarstvo.

Najpoznatije višekriterijumske metode su:

- AHP - Analytical Hierarchy Process [8], Thomas L. Saaty
- PROMETHEE (I, II) - Preference ranking organization method for enrichment evaluation [9], Jean-Pierre Barns

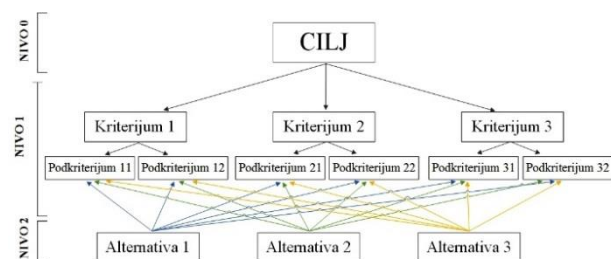
- TOPSIS - Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution [10], Ching-Lai Hwang
- VIKOR - Višekriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje (Multicriteria Optimization and Compromise Solution) [11], S. Opricovic
- ELECTRE (I, II, III, IV) - franc. ELimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELimination and Choice Expressing REALity) [12], Bernard Roy

U poglavljima 4.1 - 4.5 su prikazane teorijske osnove višekriterijumskih metoda primenjenih u ovom radu. Uz teorijsku osnovu svake od metoda, na kraju su prikazani i rezultati analize optimizacije izbora hidrauličnih bagera.

4.1 AHP metoda

Analytical Hierarchy Process (AHP) je matematička metoda sa višekriterijumskim pristupom u odlučivanju. Osmislio je Tomas L. Saaty [13] i spada u najpoznatije i najprimenjenije metode koje se koriste u analizi postojećih podataka. AHP metoda pruža mogućnost da se u procesu donošenja složenih odluka izmere i povezuju različiti faktori što olakšava kombinovanje delova u celinu [14].

Hijerarhijska struktura AHP metode prikazana je na slici 1.



Slika 1 - Hijerarhijska struktura AHP metode

Matematički sled proračuna AHP metode započinje međusobnim upoređivanjem dva elementa. Upoređivanje se vrši primenom Saaty-jeve skale. Procena težinskih koeficijenata (W) data je jednačinom 6, nakon čega se formira matrica M čijim se računanjem dobijaju vrednosti preferencija.

$$W = \sum_{j=1}^n \frac{W_j}{W_j} = W_i \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{W_j} \right) \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$M = \begin{bmatrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & \dots & w_1 / w_n \\ w_1 / w_1 & w_2 / w_2 & \dots & w_2 / w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n / w_1 & w_n / w_2 & \dots & w_n / w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Poslednji korak u AHP metodi je provera konzistentnosti donosioca odluke izračunavanjem indeksa konzistentnosti (CI) i stepen konzistentnosti (CR), preko jednačina datih respektivno

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}, \quad (8)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (9)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (10)$$

gde je: λ_{\max} maksimalna vrednost izračunate matrice a RI slučajni indeks konzistentnosti koji zavisi od broja analiziranih objekata n . Uslov konzistentnosti je da vrednost CR bude manja od 0,1 (10%).

Prema definisanom matematičkom modelu, AHP metoda je u prvom koraku iskorišćena za definisanje težinskih faktora (faktora preferencija) razmatranih parametara. S obzirom da je u analizu uključeno 12 parametara mašine, njihov međusobni odnos prioriteta prikazan je u tabeli 4.

AHP metoda na najkvalitetniji način daje rang koeficijentata preferencije osnovnih kriterijuma koji će nadalje biti korišćeni u svim metodama pri rangiranju alternativa.

Tabela 4. Težinski koeficijenti parametara

Prioritet	Parametar	Koeficijent preferencije
1	Sila kovanja	0,130
1	Operativni troškovi	0,130
1	Tehnička raspoloživost	0,130
1	Emisioni standard	0,130
2	Snaga motora	0,068
2	Pritisak hidrosistema	0,068
2	Troškovi nabavke	0,068
2	Prosek intervencija	0,068
2	Lakoća upravljanja	0,068
2	Udobnost opsluživanja	0,068
3	Maksimalna dubina kovanja	0,037
3	Moto sati godišnje	0,037

Vrednosti provere konzistentnosti, AHP metode u definisanju koeficijenta preferencije:

$$\lambda_{\max} = 12,02$$

$$n = 12$$

$$RI = 1,48$$

$$CI = 0,001863$$

$$CR = 0,001259 \quad 0,13\% \text{ (zadovoljen uslov)}$$

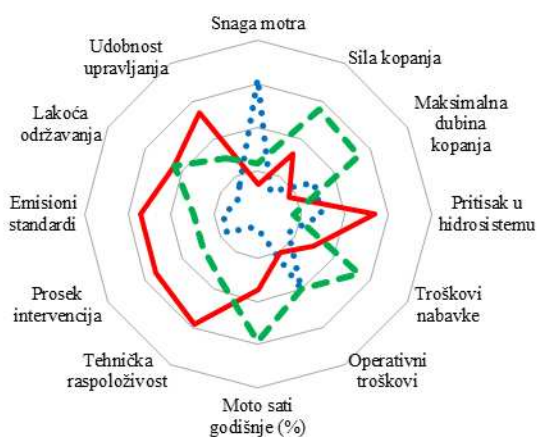
Nakon definisanja koeficijentata preferencije, AHP metoda je primenjena za izračunavanje najpogodnijeg tipa hidrauličnih bagera prema postavljenim parametrima. Rezultati analize prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati primene AHP metode

AHP				
Alternativa proizvođač	tip	izračunati koeficijent t	%	rang
14 Oktobar	BGH 1000G	0,21445	21,4	3
Caterpillar	323 DLH	0,40145	40,1	1
New Holland	E215 B	0,38410	38,4	2

Prilikom rangiranja svih alternativa u izboru za definisane parametre, nivo konzistentnosti bio je u granicama dozvoljenog.

Slika broj 2 predstavlja grafički prikaz rezultata. Može se uočiti koja je od razmatranih mašina najbolja prema pojedinačnim parametrima analize.



Slika 2 - Grafički prikaz rezultata AHP metode

4.2 PROMETHEE metoda

Metoda je zasnovana na uopštavanju pojma kriterijuma sa šest tipova generalizovanih kriterijumskih funkcija. Na osnovu tih funkcija definiše se matematička relacija za rangiranje. Korisnik ima slobodu da uvede nove tipove generalizovanih kriterijuma i iskazuje svoje preference uvođenjem težinskih koeficijentata.

Matematički princip PROMETHEE metode zasniva se na uvođenju funkcije preference $P(a, b)$ za alternative a i b koje su vrednovane kriterijumskim funkcijama (označimo jednu od njih sa f). Ako je alternativa a bolja od alternative b , prema kriterijumu $f: f(a) > f(b)$. Funkcija preference se definiše na sledeći način:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } f(a) \leq f(b) \\ P(f(a) - f(b)), & \text{ako je } f(a) > f(b) \end{cases} \quad (1)$$

Prema metodama iz familije PROMETHEE, postoji šest različitih tipova funkcija preference (tabela

6). Vrednosti parametara q , r i σ treba odrediti ili zadati za svaku kriterijumsku funkciju prema usvojenom tipu preferencije. Funkcija preferencije $P(a, b)$ se odnosi na upoređivanje alternativa a i b .

Tabela 6. Funkcije preferencije PROMETHEE metode

	Kriterijum	Funkcija
I	Običan (Usual shape)	$P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } d \leq 0 \\ 1, & \text{ako je } d > 0 \end{cases}$
II	Kvazi (U-shape)	$P(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } d \leq q \\ 1, & \text{ako je } d > q \end{cases}$
III	Linearni (V-shape)	$P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ako je } d \leq q \\ d/p & , & \text{ako je } q < d \leq p \\ 1 & , & \text{ako je } d > p \end{cases}$
IV	Nivoski (Level-shape)	$P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ako je } d \leq q \\ 1/2 & , & \text{ako je } q < d \leq p \\ 1 & , & \text{ako je } d > p \end{cases}$
V	Linearni sa područjima indiferencije	$P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ako je } d \leq q \\ (d-q)/(p-q) & , & \text{ako je } q < d \leq p \\ 1 & , & \text{ako je } d > p \end{cases}$
VI	Gausov (Gaussian preference)	$P(a,b) = \begin{cases} 0 & , & \text{ako je } d \leq 0 \\ 1 - e^{-(d^2/2\sigma^2)} & , & \text{ako je } d > q \end{cases}$

U datim funkcijama parametar p predstavlja najmanje odstupanje dve ocenjivane alternative koje treba smatrati značajnim. Parametar q predstavlja najveće moguće odstupanje između dve ocenjivane alternative koje treba smatrati neznačajnim. Parametar σ je Gausov prag značajnosti i predstavlja odstupanje između dve ocenjivane alternative koje se smatra srednjim stepenom preference.

Multikriterijumski koeficijent preferencije alternative a nad b definisan je izrazom:

$$\prod(a,b) = \sum_{i=1}^n w_i P_i(a,b) \quad (2)$$

gde je: n – broj kriterijuma, w_i – težina i -tog kriterijuma.

Suma svih težina w jednaka je jedinici, što je postavljeno kao uslov. Da bi se to postiglo neophodna je normalizacija originalnih težina. Za multikriterijumsku analizu uvode se tokovi preferencije:

$$\varphi^+(a_j) = \sum_{m=1}^j \prod(a_j, a_m) \quad (3)$$

$$\varphi^-(a_j) = \sum_{m=1}^j \prod(a_m, a_j) \quad (4)$$

Kako bi se ostvarilo multikriterijumsko rangiranje uvodi se neto tok:

$$\varphi_j(a_j) = \varphi^+(a_j) - \varphi^-(a_j); \quad j = 1, \dots, J \quad (5)$$

gde je: J – broj alternativa

Alternativa a_j je multikriterijumski bolja od a_k ako je $\varphi_j > \varphi_k$.

Prema definisanom matematičkom modelu metode PROMETHEE, dobijeni su sledeći rezultati za razmatrani izbor.

Tabela 7. Rezultati primene PROMETHEE metode

PROMETHEE			
Alternativa proizvođač	tip	izračunati koeficijent	rang
14 Oktobar	BGH 1000G	-0,62958	3
Caterpillar	323 DLH	0,29575	1
New Holland	E215 B	0,33382	2

4.3 VIKOR metoda

Metodu VIKOR razvio je Serafim Opricović, za potrebe rešavanja problema u odlučivanju prilikom razmatranja konfliktnih i raznorodnih kriterijuma koji utiču na donošenje odluke.

Metoda bazira na pretpostavci da je kompromis prihvatljiv za rešavanje konflikta, da donosilac odluke želi rešenje koje je najbliže idealnom i da su alternative vrednovane prema svim postavljenim kriterijumima. Razvijena na takvim osnovama da se donosiocu odluke predlažu alternative koje predstavljaju kompromis između želja i mogućnosti ili kompromis između različitih interesa učesnika u odlučivanju. Kompromisno rešenje je rešenje koje je najbliže idealnom slučaju [15].

Matematički proračun metode započinje se formiranjem matrice odlučivanja:

$$M = \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_m \\ w_1 & w_2 & \dots & w_m \\ A_1 \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \end{bmatrix} \\ A_2 \begin{bmatrix} x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n \begin{bmatrix} x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

Metoda se sastoji iz četiri koraka:

- Određivanje najveće (x_i^*) i najmanje (x_i^-) vrednosti datog kriterijuma.

$$x_i^* = \max_j x_{ij}$$

$$x_i^- = \min_j x_{ij}$$

(12)

- Računanje vrednosti S_j pesimističkog rešenja i R_j očekivanog rešenja.

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{(x_i^* - x_{ij})}{(x_i^* - x_i^-)}$$

$$R_j = \max_i \left[w_i \frac{(x_i^* - x_{ij})}{(x_i^* - x_i^-)} \right] \quad (13)$$

gde je w_i – težina kriterijuma.

- Računanje vrednosti za Q_j (kompromisno rešenje).

$$Q_j = v \frac{(s_j - s^-)}{(s^* - s^-)} + (1-v) \frac{(R_j - R^-)}{(R^* - R^-)} \quad (14)$$

gde je:

$$S^- = \min_j S_j; S^* = \max_j S_j$$

$$R^- = \min_j R_j; R^* = \max_j R_j \quad (15)$$

Rangiranje se izvodi sortiranjem alternativa prema merama R_j , S_j i Q_j .

Tabela 8 prikazuje rezultate primene VIKOR metode za razmatrani problem. Iz prikazane tabele, može se uočiti da su rezultati rangiranja isti pri promeni osetljivosti modela.

Tabela 8. Rezultati primene VIKOR metode

VIKOR					
Alternativa proizvođač	tip	koef. (0,5)	koef. (0,6)	koef. (0,7)	rang
14 Oktobar	BGH 1000G	1,0000	1,0000	1,0000	3
Caterpillar	323 DLH	0,5997	0,5197	0,4396	2
New Holland	E215 B	0,0000	0,0000	0,0000	1

4.4 TOPSIS metoda

Metoda TOPSIS je zasnovana na konceptu da izabrana alternativa treba da ima najkraće rastojanje od idealnog rešenja i najduže od anti-idealnog rešenja. To znači da je pozitivno „idealno“ rešenje sačinjeno od svih najboljih vrednosti koje se mogu dobiti iz razmatranih kriterijuma, dok je negativno „idealno“ rešenje sačinjeno od svih negativnih vrednosti [16].

Matematička interpretacija metode TOPSIS započinje formiranjem matrice M

$$C_1 \dots C_n$$

$$M = \begin{bmatrix} A_1 & x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

gde su: A_1, \dots, A_m alternative, C_1, \dots, C_n kriterijumi, x_{ij} je rang alternative prema kriterijumu.

U sledećem koraku vrši se normalizacija matrice:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad i=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, n \quad (17)$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{i \max}} \quad i=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, n \quad (18)$$

Nakon normalizacije, matrica se ponderiše njenim težinskim koeficijentima,

$$P_{ij} = w_i \cdot r_{ij}, \quad i=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, n \quad (19)$$

Potom se formiraju idealno (A^+) i anti-idealno (A^-) rešenje, a zatim se računa udaljenost svake alternative od idealnog rešenja (S_i^+ , S_i^-) [17]:

$$A^+ = \left(\begin{matrix} \text{MAX} \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in K^+ \right) i \left(\begin{matrix} \text{MIN} \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in K^- \right) = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_n\} \quad (20)$$

$$A^- = \left(\begin{matrix} \text{MIN} \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in K^+ \right) i \left(\begin{matrix} \text{MAX} \\ i \end{matrix} v_{ij} \mid j \in K^- \right) = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_n\} \quad (21)$$

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (22)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (23)$$

Poslednji korak u TOPSIS metodi je računanje relativne bliskosti alternative idealnom rešenju,

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (24)$$

Rang vrednost C_i poredanih u opadajući niz (od najveće do najmanje vrednosti) odgovara rangu alternativa A_i (od najbolje do najlošije).

Rangiranje alternativa u izboru (hidrauličnih bage-ra) prema metodi TOPSIS data je u tabeli 9.

Tabela 9. Rezultati primene TOPSIS metode

TOPSIS			
Alternativa proizvođač	tip	izračunati koeficijent	rang
14 Oktobar	BGH 1000G	0,28462	3
Caterpillar	323 DLH	0,74558	1
New Holland	E215 B	0,53238	2

4.5 ELECTREE metoda

Familija metoda eliminacije i izbornog predstavljanja stvarnosti (ELECTRE) orjentisana je ka rešavanju problema multiatributivnog odlučivanja, tako što se evaluacija mogućih (alternativnih) odluka izvodi poređenjem atributa. Smatra se metodom pogodnom

za diskretne probleme u slučaju raznorodnih kriterijumskih funkcija. Bazira na poređenju dve alternative (a i b), gde alternativa a nadmašuje alternativu b kada je bolja za većinu razmatranih kriterijuma i kada ne postoje kriterijumi po kojima je alternativa a striktno lošija od alternative b [18].

Matematički model ELECTRE metode sastoji se iz devet sekventivnih faza. Ako je pretpostavka da se vrši izbor jedne od m alternativa A_i ($i=1, 2, \dots, m$) na osnovu n kriterijuma ($j=1, 2, \dots, n$). Svaka alternativa prikazana je vektorom:

$$A_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}] \quad (25)$$

gde je x_{ij} vrednost j -tog atributa za i -tu alternativu.

U prvom koraku metode, određuje se normalizovana matrica r_{ij} (r_{ij}^+ za pozitivne, r_{ij}^- za negativne atribute),

$$r_{ij}^+ = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad (26)$$

$$r_{ij}^- = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{x_{ij}}\right)^2}}, \quad (27)$$

Potom se određuju preferencijske normalizovane matrice v_{ij} , nakon čega se definišu skupovi saglasnosti (29) i nesaglasnosti (30):

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad j=1, 2, \dots, n \quad (28)$$

$$c(a, b) = \frac{\sum_{j \in C_{ks}} w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad \text{za} \quad C_{ks} = \left\{ j \mid \frac{j}{x_{kj}} \geq x_{sj} \right\}, \quad (29)$$

$$d_{ks} = \frac{\max_{j \in D_{ks}} |v_{kj} - v_{sj}|}{\max_{j \in J} |v_{kj} - v_{sj}|} \quad \text{za} \quad D_{ks} = \left\{ j \mid \frac{j}{x_{kj}} < x_{sj} \right\} \quad (30)$$

U sledećem koraku se određuju matrice dominacije saglasnosti f_{ks} i nesaglasnosti g_{ks} koje mogu uzimati vrednosti od 0 do 1,

$$c = \frac{\sum_{k=1, k \neq s}^m c_{ks}}{m(m-1)}, \quad s=1, 2, \dots, n \quad (31)$$

$$f_{ks} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } c_{ks} \geq c \\ 0, & \text{ako je } c_{ks} < c \end{cases}$$

$$d = \frac{\sum_{k=1, k \neq s}^m d_{ks}}{m(m-1)}, \quad s=1, 2, \dots, n \quad (32)$$

$$g_{ks} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } d_{ks} \geq d \\ 0, & \text{ako je } d_{ks} < d \end{cases}$$

Na osnovu matrice dominacije slaganja i neslaganja, formira se agregatna matrica dominacije indeksa e_{ks} :

$$e_{ks} = f_{ks} g_{ks} \quad (33)$$

ako je $e_{ks}=1$, tada je alternativa A_k preferirana u odnosu na alternativu A_s po oba kriterijuma, ako postoji mogućnost da je A_k bude dominantna nad drugim alternativama.

Prema prethodno definisanom matematičkom postupku ELECTREE metode, izvršeno je rangiranje hidrauličnih bagera. Krajnji rezultati suma agregatne dominacije kao i rang alternativa prikazan je u tabeli 10.

Tabela 10. Rezultati primene ELECTREE metode

ELECTREE			
Alternativa proizvođač	tip	suma agregatne dominacije	rang
14 Oktobar	BGH 1000G	0,0	3
Caterpillar	323 DLH	2,0	1
New Holland	E215 B	1,0	2

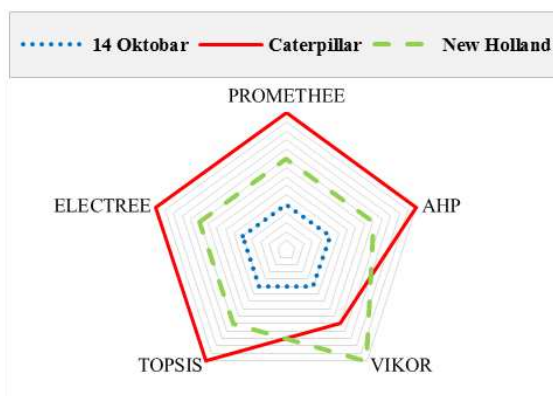
5. REZULTATI ANALIZE

Nakon što su kroz poglavlje 4 definisane teorijske osnove višekriterijumskih metoda i rang alternativa u izboru, stvorena je mogućnost za analiziranje dobijenih rezultata. U tabeli 11 prikazana je uporedni rang alternativa u izboru u zavisnosti od metode koje je primenjena.

Tabela 11. Rang alternativa

Alternativa proizvođač	Tip	Rang					
		AHP	PROMETHEE	VIKOR	TOPSIS	ELECTREE	UKUPNO
14 Oktobar	BGH 1000G	3	3	3	3	3	3,0
Caterpillar	323 DLH	1	1	2	1	1	1,2
New Holland	E215 B	2	2	1	2	2	1,8

Može se uočiti da je rang alternativa kod svih metoda izuzev metodu VIKOR isti, tj. najpogodniji hidraulični bager za definisane uslove rada je Caterpillar 323 DLH, potom sledi New Holland E215B dok najlošije rezultate ima 14 Oktobar BGH 1000G. Poslednja kolona u tabeli 11 prikazuje ponderisane vrednosti rang alternativa prema svim metodama koje su primenjene. Pored tabelarnog prikaza, krajnji rezultati dati su i u grafičkom obliku na slici 3.



Slika 3 - Grafički prikaz rezultata analize

6. ZAKLJUČAK

Rad pokazuje mogućnosti primene različitih višekriterijumskih metoda za analizu postojećih podataka o radu hidrauličnih bagera. Korišćene su: metoda AHP (Analytical Hierarchy Process), PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluation), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR (Multi-criteria Optimization and Compromise Solution) i ELECTRE (ELimination and Choice Expressing REality). Navedene višekriterijumske metode pružaju mogućnost upoređivanja parametara čije numeričke vrednosti nisu međusobno merljive. Takođe, treba napomenuti da višekriterijumske metode pružaju jednostavnu mogućnost analize osetljivosti prema određenom kriterijumu, koja se može jednostavno ispitati promenama njihovih težina funkcija preferencija.

Na osnovu izvršene uporedne analize različitih metoda, može se zaključiti da je metoda koja daje najpotpuniji rezultat, tj. metoda čiji se rezultat u najvećoj meri može dalje tumačiti AHP metoda. Ona daje ocenu alternativa prema svakom od razmatranih kriterijuma.

Pored hidrauličnih bagera, višekriterijumske metode mogu se primeniti i u analizi drugih rudarskih mašina radi kvalitetnijeg praćenja njihovog trenutnog rada ali i radi adekvatnog izbora pri eventualnoj kupovini nove mašine jer je često politika kompanije takva da nije moguća kupovina mašine istog tipa i proizvođača.

7. ZAHVALNICA

Ovaj članak je doprinos projektu TR035040 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

[1] Sinclair R, *Hydraulic Excavators: Quarrying & Mining Application*. Sheffield, UK: Sinclair Publishing, ISBN 9781906148355, 2011.

[2] Ignjatović D. *Rudarske mašine*. Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, skripta, 285-290, 2013.

[3] Studija „Optimizacija organizacije sredstava i troškova pomoćne mehanizacije u cilju povećanja stepena iskorišćenja jalovinskih i ugljenih sistema na površinskim kopovima EPS-a“, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2018.

[4] Đenadić S, Miletić F, Jovančić P, Janković I, Lazić M, Analitičko hijerarhijski proces primenjen za selekciju hidrauličnih bagera na površinskim kopovima, *VIII Međunarodna konferencija OMC 2018*, Jugoslovenski komitet za površinsku eksploataciju, Zlatibor, Srbija, pp. 14-22, 17-20 oktobar 2018. ISBN978-86-83497-25-6, 2018.

[5] Miletić F, Đenadić S, Kovač A, Ivanović J, Analiza emisije štetnih gasova pomoćne mehanizacije na površinskim kopovima RB Kolubara“, *VI savetovanje sa međunarodnim učesćem „Energetika i rudarstvo 2018“*, Privredna komora Srbije, Sremski Karlovci, pp. 284-293, 28-30 mart 2018. ISBN 978-86-80420-16-5

[6] Jovančić P, *Održavanje rudarskih mašina*, Beograd, Rudarsko-geološki fakultet, 2014.

[7] Behzadian M, Kazemzadeh R B, Albadavi A & Aghdasi M, PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and application, *European Journal of Operational Research*, 200, pp. 198-215, DOI:10.1016/j.ejor.2009.01.021, 2010.

[8] Bescetin A, A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine. *Environmental Geology*, 52, pp. 663-672. 2007.

[9] Mohamadibadi H S, Tichkowsky G, Kumar, A. Development of a Multi-Criteria Assessment Model for Ranking of Renewable and Non-Renewable Transportation Fuel Vehicles, *Energy*, 34, pp. 112-125, 2009. DOI: 10.1016/j.energy.2008.09.004

[10] Ashrafzadeh M, Rafiei F M, Isfahani M-N, Zare Z, Application of fuzzy TOPSIS method for the selection of Warehouse Location: A Case Study. *Interdisciplinary, Journal Of Contemporary Research In Business*, 3, pp. 655-671, 2012.

[11] Dalapati S, Pramanik S, A revisit to NC-VIKOR based MAGDM strategy in neutrosophic cubic set environment, *Neutrosophic Sets and Systems*, 21, pp. 131-141, DOI: 10.5281/zenodo.1235367, 2018.

[12] Abedi M, Norouzi H G, Hamzeh M, ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical

- data in mineral prospectivity mapping, *Journal of Applied Geophysics*, 87, pp. 9-18, 2012.
- [13] Saaty L T, Decision Making: The Analytical Hierarchy Process. New York, USA: Mc-Graw-Hill, 1980.
- [14] Russo F S M, Camanho R, Criteria in AHP: a Systematic Review of Literature. *Procedia Computer Science*, 55, pp. 1123-1132, 2015. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.081
- [15] Stojanović S, Razvoj modela za evaluaciju internet informacionih resursa primenom metoda višekriterijumskog odlučivanja. *Doktorska disertacija*, Zaječar pp. 52-55, 2016.
- [16] Krohling R A, Pacheco A G C, A-TOPSIS - An Approach Based on TOPSIS for Ranking Evolutionary Algorithms. *Procedia Computer Science*, 55, pp. 308-317, DOI:10.1016/j.procs.2015.07.054, 2015.
- [17] Tsaor R. C, Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. *Applied Mathematics and Computation* 218(8), pp. 4295-4304, doi:10.1016/j.amc.2011.10.001, 2011.
- [18] Hudej M-M. Multivarijabilni modeli upravljanja u rudarstvu, *Doktorska disertacija*, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd. pp. 32-40, 2013.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF MULTI-CRITERIA METHODS IN OPTIMIZING THE SELECTION OF HYDRAULIC EXCAVATORS ON OPEN-CAST COAL MINING

Hydraulic excavators are used in different areas of industry, most often in construction and mining. On open-cast coal mines with continuous systems, they are classified as auxiliary machinery, while on open-cast coal mines with discontinuous systems they are basic machinery. As their application is necessary in both cases, it is important to carry out an adequate analysis of the existing data in order to optimize the choice of the type of hydraulic excavator in relation to the working conditions of a particular open-cast mine. This paper aims to demonstrate the potential of multi-criteria optimization methods that are used in the analysis of hydraulic excavators. Different multi-criteria methods used for the analysis of hydraulic excavators are described. All advantages and disadvantages of these methods are presented, as well as the quality of output information which can affect the future purchasing decisions of this machinery.

Key words: multi-criteria methods, open-cast coal mine, auxiliary machines, hydraulic excavators.