

IZBOR OPTIMALNE TRASE KAMIONSKOG TRANSPORTA  
UGLJA IZ RUDNIKA MARIOVO DO REK BITOLA

CHOICE OF OPTIMAL ROUTE FOR TRUCK COAL  
HAULAGE FROM MARIOVO MINE TO REK BITOLA

DOI:10.25075/SI.2017.10

Zoran Despodov<sup>1</sup>, Zoran Panov<sup>1</sup>, Saša Mitic<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet Goce Delčev, Štip, R. Makednija

<sup>2</sup>Rudarski Institut, Beograd

*zoran.despodov@ugd.edu.mk*

**Sažetak:** U radu je prezentovana metodologija izbora optimalne trase kamionskog transporta uglja iz Rudnika Mariovo do REK (termoelektrane Bitola. Metodologija je bazirana na višekriterijumske optimizacije raspoloživih alternativa. Sam rad je deo Fizibiliti studije za izbor optimalnog spoljašnjog transporta uglja iz Rudnika Mariovo do REK Bitola gde je kamionski transport jedna od mogućih alternativa transporta pored ostalih vrsta transporta, kao što su: trakasti, hidraulični, šinski i transport sa žičarom.

**Ključne reči:** TRANSPORT, OPTIMIZACIJA, KAMIONI, PUT.

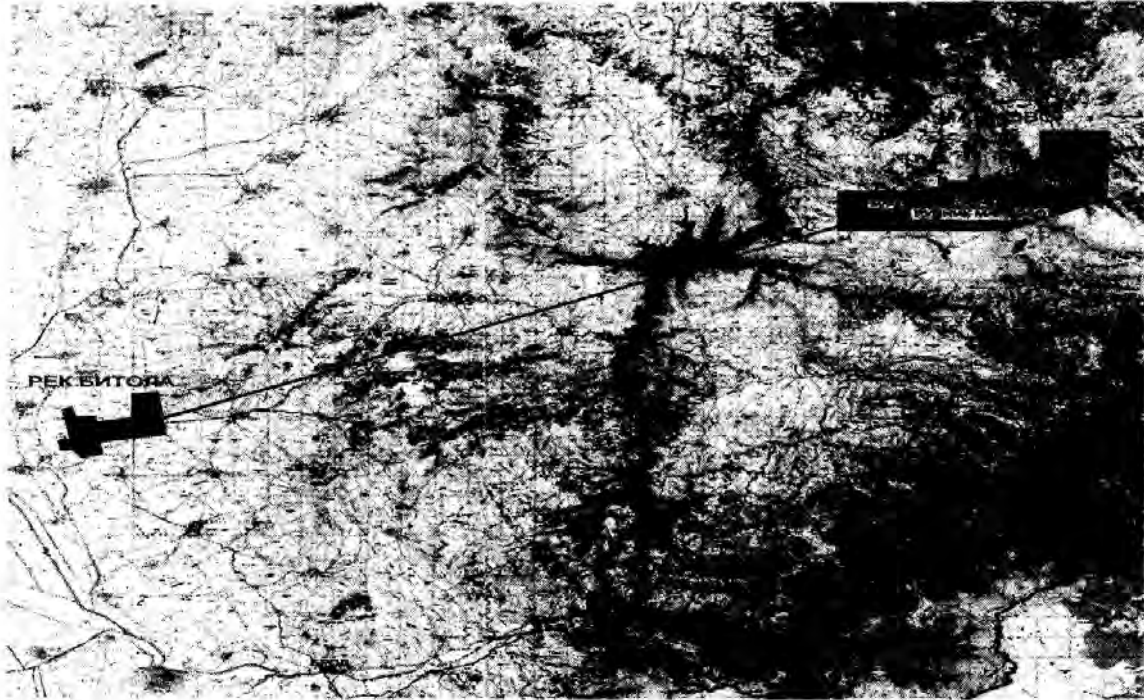
**Abstract:** This paper presents the methodology for choosing the optimal route of truck transport of coal from the Mine to the REK (powerplant) Bitola. The methodology is based on multi-criteria optimization of the available alternatives. The paper itself is part of the Feasibility Study for choosing the optimal external transport of coal from the Mariovo mine to REK Bitola, where truck transport is one of the possible alternative transports in addition to other types of transport, such as: conveyors, hydraulic, railroad and transport with cable car.

**Key words:** TRANSPORT, OPTIMIZATION, TRUCKS, LANE.

## UVOD

Rudnik uglja Mariovo se nalazi u jugozapadnom delu Makedonije, u blizini Crne Reke, na rastojanju od 30 km vazdušne linije, od postojeće Termoelektrane Bitola. Godišnja proizvodnja uglja je projektovana na 2 miliona tona. Teren je slabo naseljen i naseljena mesta su sa malim brojem stanovnika. Radi se o veoma brdovitom terenu sa složenom konfiguracijom, slika 1.

U preliminarnim istraživanjima obrađene su četiri varijante trasa transporta, označene kao trasa A, trasa B, trasa C i trasa D. Ove trase imaju svoje specifičnosti u pogledu uslova trase koji su uzeti u obzir kod ove analize. Nakon analiza, nametnuo problem izbora optimalne trase puta za kamionski transport koji se upoređuje sa drugim varijantam transporta uglja.



*Slika 1, Lokacije Rudnika Mariovo i REK Bitola na topografskoj karti*

## PRINCIPI VIŠEKRITERIJUMSKE OPTIMIZACIJE

U poslednje vreme, za izbor optimalne varijante, odnosno rešenja iz više raspoloživih varijanti, koristi se višekriterijumska optimizacija kao matematička metoda. Kod ove metode koristi se veći broj kriterijuma kod procesa odlučivanja, koje su najčešće međusobno konfliktnе. Krajni rezultat višekriterijumske optimizacije je izbor optimalne varijante ili rangiranje raspoloživih varijanti.

Za razliku od jednokriterijumskog optimizacionog modela, odnosno modela sa jednom funkcijom cilja definisanom nad skupom ograničenja, višekriterijumski optimizacioni modeli operišu sa dve ili više funkcija cilja, za koje je potrebno pronaći optimalne vrednosti, nad definisanim skupom ograničenja.

Često, postavljanje više kriterijuma dovodi do takvih nesaglasnosti, da potpuno postizanje jednog cilja može negativno da utiče na preostale ciljeve. Donosilac odluke u ovakvim situacijama ne nastoji da maksimizira zadate ciljeve, već da ih dostigne do što je moguće većeg stepena. Osnovna karakteristika svakog višekritejumskog problema je postojanje više kriterijuma za odlučivanje i više alternativa za izbor najprihvatljivije varijante.

Višeatributivno odlučivanje [4], kao jedna metoda višekriterijumskog odlučivanja karakteriše se potrebom izbora najprihvatljivije alternative  $a^*$ , iz skupa alternativa predstavljenih

na osnovu definisanih kriterijuma. Prema tome, moguće je definisati opšti matematički model višeatributivnog odlučivanja i on glasi:

$$\max [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad n \geq 2$$

$$x \in A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$$

gde je:

n – broj kriterijuma,

m – broj alternativa (akcija za izbor),

A – poznati konačan skup alternativa.

Kao meru dostizanja svakog kriterijuma, po definisanoj alternativni, javlja se atribut. Samim tim, svaki atribut zavisi od j-tog kriterijuma i od i-te alternative, odnosno on ima dvodimenzionalni karakter, i označava se sa  $x_{ij}$ , pri čemu je:

$$x_j = f_j(a_i); \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n};$$

Ustaljeni način prikazivanja modela višeatributivnog odlučivanja je preko matrice, koja se naziva matricom odlučivanja i obeležava se sa (O).

$$O = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & \dots & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Za izbor optimalne trase kamionskog transporta uglja iz Rudnika Mariovo do REK Bitola primenili smo metodu jednostavnih aditivnih težina, koja spada u grupi matematičkih metoda višekriterijumske optimizacije. U daljem tekstu dat je kratak opis ove matematičke metode.

### Metoda jednostavnih aditivnih težina (MJAT)

Ova metoda spada u grupu metoda kod kojih donosilac odluke može da utiče na izbor konačnog rešenja, dodeljivanjem težinskih koeficijenata kriterijumima, čime on izražava svoje preference, odnosno važnost svakog pojedinačnog kriterijuma, [1],[3],[4].

Kod rešavanja konkretnog problema ovim metodom na početku se moraju sprovesti koraci modifikiranja početnom matricom odlučivanja, odnosno da se izvrši: kvantifikacija, normalizacija i linearizacija početne matrice.

### Kvantifikacija kvalitativnih atributa

Prilikom formiranja matrice odlučivanja, čest je slučaj da se vrednosti atributa, za svaku akciju po određenom kriterijumu predstavljaju kao kvalitativne vrednosti. Pri tome se javlja-

ju problemi kako izvesti poređenje kvalitativne sa kvantitativnom vrednosti atributa. Za prevazilaženje pomenutog problema, vrši se tzv. Kvantifikacija kvalitativnih atributa, odnosno prevodjenje kvalitativnih atributa u kvantitativne. Primer kvantifikacije kvalitativnih atributa za odgovarajući kriterijum je prikazan u tabeli 1.

Tabela 1, Kvantifikacija kvalitativnih atributa

Kvalitativna ocena	Loš	Dobar	Prosečan	Vrlo dobar	Odličan	Tip kriterijuma
Kvantitativna ocena	1	3	5	7	9	max
	9	7	5	3	1	min

### Vektorska normalizacija

Po završenoj kvantifikaciji kvalitativnih atributa podaci se i dalje predstavljaju u matricnoj formi i to je tzv. kvantifikovana matrica odlučivanja. Elementi kvantifikovane matrice odlučivanja su često sa velikim rasponima brojnih vrednosti. To je razlog da se isti svedu na interval [0,1], odnosno da se uproseče, primenom tzv. Vektorske normalizacije. Pri tome je potrebno voditi računa o zaokruživanju elemenata matrice odlučivanja (najmanje na treću decimalu), jer se veliki rasponi između elemenata matrice odlučivanja sada svode na interval [0,1], odnosno postoji mogućnost unošenja greške u podacima, što može imati za posledicu pogrešno rešenje problema.

Postupak normalizacije kvantifikovane matrice obavlja se na sledeći način:

- Za svaku kolonu MO izračuna se norma kao:

$$norma = \sqrt{\sum_{i=1}^m x_j^2} ; \quad j = \overline{1, n}$$

Gde je:  $x_{ij}$  - vrednost j-tog atributa po i-toj alternativni.

- Normalizovani element MO izračunava se na sledeći način:

Kod kriterijuma tipa max:

$$n_j = \frac{x_j}{norma} ;$$

Kod kriterijuma tipa min

$$n_j = 1 - \frac{x_j}{norma} ;$$

gde je:  $n_{ij}$  - normalizovani element MO.

**Linearizacija atributa**

Imajući u vidu da vrednosti atributa pojedinih kriterijuma imaju različite merne jedinice (cena u valuti, vreme u časovima, brzina u km/h itd.) pomoću linearizacije vrši se njihovo svodenje na bezdimenzionalni broj.

U zavisnosti od tipa kriterijuma (max/min), izračunavanje linearizovanih elemenata ( $l_j$ ) matrice odlučivanja vrši se na sledeći način:

Kod kriterijuma tipa max:

$$l_j = \frac{x_j}{x_j^*}$$

gde je:  $x_j^* = \{x_j \mid \max x_j\}$   $i = \overline{1, m}$ ;  $j = \overline{1, n}$ ;

Kod kriterijuma tipa min:

gde je:  $x_j^{\min} = \{x_j \mid \min x_j\}$   $i = \overline{1, m}$ ;  $j = \overline{1, n}$ ;

**Izbor najprihvatljivije alternative**

Vektor težinskih koeficijenata koje se dodeljuju pojedinim kriterijumima je:

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_n]$$

Pri čemu mora biti ispunjen sledeći uslov:

$$\sum_{j=1}^n t_j = 1$$

Kod ove metode potrebno je formirati sledeći matični proizvod iz matrica:

$$T = \|t_j\| \text{ i } O = \|l_j\|, \text{ tako da je: } T \times O = R \text{ ili:}$$

$$[t_1, t_2, t_3, \dots, t_n] \times \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & \dots & l_{1n} \\ l_2 & l_2 & \dots & l_{2n} \\ l_3 & l_3 & \dots & l_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{m1} & l_{m2} & \dots & l_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \dots \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix}$$

Izbor najbolje alternative vrši se primenom sledeće relacije:

$$a^* = \left\{ a_i \mid \frac{\max_j \sum_{j=1}^n t_j l_{ij}}{\sum_{j=1}^n t_j} \right\}; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n};$$

gde su:

$a_i$  – raspoložive alternative u modelu,

$t_j$  – vektor težinskih koeficijenata kriterijuma,

$l_{ij}$  – elementi linearizovane matrice odlučivanja.

Optimalno rešenje je, u suštini, elemenat vektora R koji ima najveću brojnu vrednost.

## PRIMENA MJAT ZA IZBOR OPTIMALNE TRASE KAMIONSKOG TRANSPORTA UGLJA IZ RUDNIKA MARIOVO DO REK BITOLA

### Formiranje matematičkog modela višekriterijumskog odlučivanja

Da bi formirali matricu odlučivanja moramo definisati kriterijume odlučivanja i alternative iz kojih će biti izvršen izbor optimalne alternative. Kriterijumi za izbor optimalne trase kamionskog transporta uglja mogu se podeliti u nekoliko kategorija, [2], i to:

- ekonomske,
- tehničke,
- sigurnosne i
- ekološke.

Od ekonomskih kriterijuma usvojili smo sledeći kriterijum:

K1 – troškove izgradnju puta(€) → min

Imajući u vidu da se radi o trasi puta kod koje mogu da se nađu različita stanja puta, i to: postojeći asfaltirani put, postojeći asfaltirani put koga treba proširiti, postojeći makadamski put, i izgradnja kompletno novog puta, ovi troškovi imaju različite vrednosti kod izabrane odgovarajuće varijante-akcije. Funkcija cilja je da ovi troškovi budu minimalni.

Kao tehničke kriterijume usvojili smo: K2-dužina puta (trase) u km → min

Dužina puta (trase) je mnogo bitan tehnički kriterijum zbog toga što od njega zavisi vreme trajanja transportnog ciklusa kamiona, a on utiče na realizovani časovni transportni kapacitet kamiona. Časovni kapacitet kamiona je u suprotnoj zavisnosti od prporcionalnosti dužine transporta. Funkcija cilja kod ovog kriterijuma je da dužina trase bude minimalna.

K3-koeficijent razvijanja (%) → min

Koeficijent razvijanja dobija se kao odnos između razlike ukupne dužine puta i dužine transport između mesta koja se povezuju putem, odnosno:

$$K_r = \frac{L_{vk} - L_o}{L_o} \cdot 100 (\%)$$

gde je:

$K_r$  – koeficijent razvijanja, (%),

$L_{vk}$  – ukupna dužina puta za odgovarajuće rešenje trase (km),

$L_o$  – dužina pravca povučena između mesta koja se povezuju putem (km).

Ukoliko sa produženjem trase ne mogu da se izbegnu određeni skupi objekti ili veći usponi, onda varijante trase koje imaju veći procenat razvijanja imaju slabiji kvalitet i zbog toga je ovde funkcija cilja minimum.

K4- koeficijent prelomnih uglova (°/km) → min

Koeficijent prelomnih uglova dobija se kao odnos između ukupnog zbira prelomnih uglova i ukupne dužine trase u km:

$$\alpha^o = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^o}{L_{vk}} \alpha^o = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i^o}{L_{vk}} \quad (°/km)$$

gde je:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^o \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i^o$$

- suma svih prelomnih uglova.

$L_{vk}$  – ukupna dužina puta za odgovarajuće rešenje trase (km).

Na osnovu ovog indikatora kvalitetnija je ona varijanta trase koja daje manji broj stepeni po dužnom kilometru, pa zbog toga funkcija cilja teži ka minimumu.

K5- srednji nagib nivelete (%) → max

Srednji nagib nivelete računa se na osnovu pojedinačnih nagiba odgovarajućih deonica iz podužnog profila trase, pomoću sledećeg obrasca:

$$i_{sr} = \frac{i_1 \cdot L_1 + i_2 \cdot L_2 + \dots + i_n \cdot L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n} (\%)$$

gde su:

$i_1 \dots i_n$  pojedinačne nagibe na odgovarajućim deonicama puta

$L_1 \dots L_n$ ,  $L_1 \dots L_n$ , izražene u %.

Poznato je da od ovog tehničkog parametara trase zavisi brzina kretanja kamiona, a time i kapacitet, potrošnja goriva i dr. Prihvatljivija je trasa koja ima manji srednji nagib trase. U konkretnom slučaju, upoređivanjem trasa dobio bi se srednji negativni nagib trase, odnosno

pad, pa je zbog toga uzeto da se funkcija cilja usmerava ka maksimumu, jer je povoljniji pad koji ima veću vrednost, zbog većeg iskorišćenja sile gravitacije.

K6-opterećenost puta saobraćajem(vozila/h) → min

Kriterijum K6 možemo svrstati u kategoriju sigurnosnih kriterijuma. Imajući u vidu da na se nekim delovima razmotrene varijante priključuju na regionalne ili magistralne puteve, vrlo je bitno kolika je frekvencija saobraćaja na tim putevima, odnosno koja je veličina saobraćajnog toka. Prihvatljivija je ona varijanta gde će biti manje opterećenje saobraćaja, i to bilo iz sigurnosnih ili ekonomskih razloga. Određeni podaci za razmotrene varijante su preuzeti iz literaturnih izvora, a neki su procenjeni na osnovu broja stanovnika u naseljenim mestima kroz koje prolaze trase.

K7-uticaji na toku javnom drumskom saobraćaju (kvalitativni kriterijum) ) → min

Kamionski transport uglja kao transportni sistem mora imati što manji uticaj na ostale transportne sisteme i transportnu infrastrukturu u svom okruženju. Prisustvo teških kamiona na magistralnim i regionalnim putevima ne samo što utiče na usporenje saobraćajnih tokova, nego utiče i na oštećenje puteva i ostalih pratećih objekata. Zbog toga, funkcija cilja je da taj uticaj bude minimalan.

K8-uticaji na životnu sredinu (kvalitativni kriterijum)→ min

Negativni uticaji kamionskog transportnog sistema i transportne infrastrukture na životnu sredinu i okolinu moguće je razmotriti kroz više faktora, od kojih ćemo navesti: aerozagađenje, zagađenje tla i vode, degradaciju terena kod izgradnje puteva, uticaje na floru i faunu, stvaranje buke, zahvatanje obradive površine, zahvatanje urbane površine i sl. Kriterijumu K8 smo dodali kvalitativne opise: malo pogoršanje ŽS, srednje pogoršanje ŽS, veliko pogoršanje ŽS, vrlo veliko pogoršanje ŽS. Razumljivo je da je ovde funkcija cilja minimum.

Na osnovu proračunatih i usvojenih vrednosti atributa pojedinačnim alternativima, sastavili smo matricu odlučivanja, koja je prikazana u tabeli 2.

Tabela 2, Matrica odlučivanja

	K1 –min Troškovi izgradnje (mil.€)	K2-min Dužina trase (km)	K3 –min Kof. razvijanja (%)	K4-min Kof. prelo-mnih uglova (°/ km)	K5 –max Srednji nagib nivelete (%)	K6 –min Opterećenost puta saobrač. (voz./h)	K7-min Uticaji na toka JS	K8-min Uticaji na ŽS
A1: Trasa A	2.739	94.9	219	31.9	0.20	2806	9	3
A2: Trasa B	14.611	71.9	142	47.8	0.23	1200	7	7
A3: Trasa C	11.194	64.7	117	81.7	0.26	500	5	5
A4: TrasaD	15.741	58.6	97	40.5	0.26	200	3	5
Tež.koef-te	0.18	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14

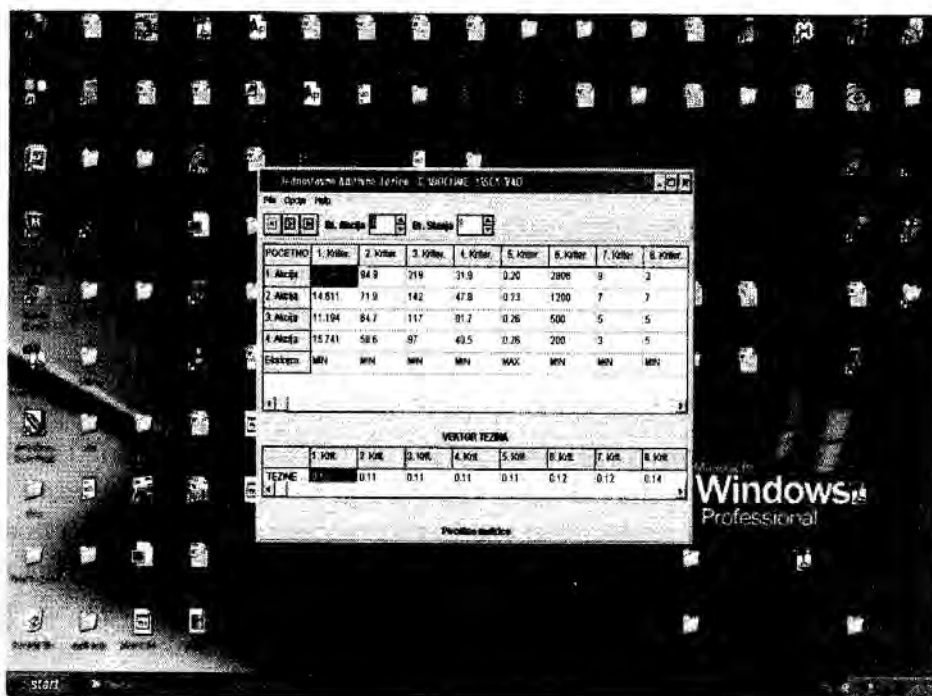
### Rešavanje matematičkog modela

Pomoću softvera VAO, prikazanog na slici 2, izvršeni su svi postupci modifikacije matrice odlučivanja, usvojen je vektor težinskih koeficijenata odgovarajućim kriterijuma i dobiven



je vektor R, iz koga se može odrediti optimalna alternativa, odnosno optimalna trasa puta. Takođe uradili smo simulaciju, u cilju određivanja najprihvatljivije varijante trase menjanjem težinskih koeficijenata pojedinim kriterijuma, tako da smo obradili tri scenarija:

- scenario 1: najveća težina je data kriterijumu K1 – troškove izgradnju puta,
- scenario 2: najveća težina je data kriterijumu K2 – dužina trase,
- scenario 3: najveća težina je data kriterijumu K8 – uticaji na ŽS.



Slika 2, Izgled glavnog menija VAO softvera

U sva tri scenarija dobio se rezultat da je najpovoljnija trasa kamionskog transporta uglja iz Rudnika Mariovo do REK Bitola Trasa D. To se može videti iz table 3.

Tabela 3, Rezultati višekriterijumske analize za različita scenarija

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Varijanta A (1.akc.)	0.679813	0.653038	0.679813
Varijanta B (2.akc.)	0.500683	0.544613	0.510328
Varijanta C (3.akc.)	0.591819	0.638091	0.606032

## ZAKLJUČAK

Istraživanja u ovom radu su pokazala da je višekriterijumska optimizacija veoma prikladan matematički aparat za rešavanje kompleksnih rudničkih problema, kao što je u konkretnom slučaju problem izbor optimalne trase kamionskog transporta uglja iz Rudnika Mariovo do REK Bitola. Imajući u vidu da kod većeg broja metoda višeciljnog i višeatributnog odlučivanja postoji određena subjektivnost kod donosioca odluke, koja se realizuje preko usvajanja vrednosti vektora težinskih koeficijenata, veoma je bitno da donosilac odluke bude specijalista, odnosno ekspert u oblasti gde se ove metode primenjuju. Takođe, veoma je bitno da veći broj kriterijuma odlučivanja bude kvantitativnog karaktera, jer je upoređenje atributa preciznije i egzaktnije.

## LITERATURA

1. Grujić, M.: *Izbor spoljašnjeg transportnog sistema višekriterijumskom analizom urudnicima uglja sa podzemnom eksploatacijom*, Podzemni radovi, br.4, RGF, Beograd, 1995.
2. Grujić, M., Nedeljković, R.: *Choice of an Optimal System for External ore Transportation*, 9th Mining Conference, Košice, 1997.
3. Panov, Z.: *Povekekriterijumski matematičko-modelski pristupi pri planiranju i projektiranju na površinskim kopovima*, doktorska disertacija (nepublikovana), RGF, [tip, 2001.
4. Čupić, M., Suknovič, M.: *Višekriterijumsko odlučivanje – metode i primeri*, Univerzitet Braća Karić, Beograd, 1994.