

Primljen / Received: 27.12.2011.

Ispravljen / Corrected: 22.2.2012.

Prihvaćen / Accepted: 12.3.2012.

Dostupno online / Available online: 25.4.2012.

# Višekriterijsko odlučivanje u planiranju i projektiranju trase željezničke pruge

## Autori:



Mr.sc. **Milana Kosijer**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Beogradu, Prometni fakultet  
[m.kosijer@sf.bg.ac.rs](mailto:m.kosijer@sf.bg.ac.rs)



Prof.dr.sc. **Miloš Ivić**, dipl.ing.saob.  
Sveučilište u Beogradu, Prometni fakultet  
[m.ivic@sf.bg.ac.rs](mailto:m.ivic@sf.bg.ac.rs)



Prof.dr.sc. **Milan Marković**, dipl.ing.saob.  
Sveučilište u Beogradu, Prometni fakultet  
[milan@sf.bg.ac.rs](mailto:milan@sf.bg.ac.rs)



**Ivan Belošević**, dipl.ing.saob.  
Sveučilište u Beogradu, Prometni fakultet  
[i.belosevic@sf.bg.ac.rs](mailto:i.belosevic@sf.bg.ac.rs)

Pregledni rad

**Milana Kosijer, Miloš Ivić, Milan Marković, Ivan Belošević**

## Višekriterijsko odlučivanje u planiranju i projektiranju trase željezničke pruge

U radu je prikazana metodologija izbora trase u procesu planiranja i projektiranja željezničke pruge koja se temelji na metodama višekriterijskog odlučivanja. Predložena metodologija omogućava cjelovito i sustavno rješavanje ovog problema, čiji krajnji rezultat je prijedlog najpovoljnije trase u skladu s usvojenim kriterijima i realnim ograničenjima. Razvijena metodologija je bazirana na metodi kompromisnog rangiranja (VIKOR), a njena verifikacija provedena je na primjeru izbora jedne od četiri varijante trase željezničke pruge na dionici Koridora X, između stanica Inđija i Novi Sad.

### Ključne riječi:

planiranje i projektiranje, trasa željezničke pruge, izbor najpovoljnije varijante, višekriterijsko odlučivanje, metoda VIKOR

Subject review

**Milana Kosijer, Miloš Ivić, Milan Marković, Ivan Belošević**

## Multicriteria decision-making in railway route planning and design

The route selection methodology, based on multicriteria decision-making and applied in railway route planning and design, is presented in the paper. The proposed methodology enables an integrated and systematic resolution of this problem, and it results in the most favourable route proposal based on predefined criteria and real-life constraints. The technology is based on the compromise ranking method (VIKOR), and it has been checked during selection of one out of four railway route alternatives on the Corridor X, between Inđija and Novi Sad train stations.

### Key words:

planning and design, railway route, best alternative selection, multicriteria decision-making, VIKOR method

Übersichtsarbeit

**Milana Kosijer, Miloš Ivić, Milan Marković, Ivan Belošević**

## Multikriterien-Beschlussfassung in der Planung und Projektierung der Eisenbahntrasse

In der Arbeit ist die Methodologie der Trassenauswahl in dem Planungs- und Projektierungsprozess einer Eisenbahngleise, die auf den Methoden der Multikriterien-Beschlussfassung beruht dargestellt. Die vorgeschlagene Methodologie ermöglicht eine ganzheitliche und systematische Lösung dieses Problems, deren Endresultat der Vorschlag der günstigsten Trasse in Einklang mit den angenommenen Kriterien und realen Beschränkungen ist. Die entwickelte Methodologie basiert auf der Methode der Kompromissklassifizierung (VIKOR). Ihre Verifizierung wurde an dem Beispiel der Auswahl einer von vier Trassenvarianten der Eisenbahngleise auf der Strecke des Korridors X, zwischen den Stationen Inđija und Novi Sad durchgeführt.

### Schlüsselwörter:

Planung und Projektierung, Eisenbahntrasse, Auswahl der günstigsten Variante, Multikriterien-Beschlussfassung, VIKOR-Methode.

## 1. Uvod

Svaka je suvremena željeznička pruga složeni sustav koji treba ostvariti postavljene ciljeve, kao što su: dovoljan kapacitet, odgovarajuća brzina prijevoza, udoban i komforan prijevoz, visok stupanj sigurnosti prometa, ekonomska opravdanost, uklapanje u postojeće i planirane prostorne planove, kao i zaštita životne sredine. Određeni ciljevi traže maksimalne vrijednosti (kapacitet, sigurnost, kvalitetu prijevoza), dok drugi traže minimalne vrijednosti (investicije za izgradnju, troškovi eksploatacije, vrijeme putovanja, utjecaj i posljedice na prostor i životnu sredinu). Osim toga neki su iskazani kvantitativno - novčanim jedinicama (investicije, troškovi), a neki pokazateljima nemonetarne prirode (vrijeme putovanja, kapacitet, sigurnost), ili čak kvalitativno preko opisnih ocjena, odnosno bodova (buka, zagađenje zraka i vode, zauzimanje zemljišta, pristupačnost, očuvanje kulturnopovijesnog i prirodnog naslijeđa, utjecaj na floru, faunu, klimu, krajolik i sl.). Ispunjenje ovako postavljenih ciljeva ukazuje na potrebu da se za planiranje i realizaciju novih ili rekonstrukciju postojećih sustava željezničkih pruga predloži nova metodologija vrednovanja i odlučivanja u procesu njihova projektiranja. Novopredložena metodologija pretpostavlja primjenu sustavnog pristupa i iterativnog optimizacijskog procesa. S obzirom da željezničke pruge pripadaju skupu diskretnih sistema, ovaj će se kompleksan višedimenzionalni optimizacijski proces odvijati preko sljedećih aktivnosti:

- formiranje skupa realnih varijantnih rješenja trase,
- vrednovanje formiranih rješenja u skladu s usvojenim kriterijima,
- rangiranje varijantnih rješenja,
- analiza i izbor najpovoljnijeg varijantnog rješenja trase.

U novopredloženom se procesu skup realnih varijantnih rješenja trase generira variranjem njezinih osnovnih tehničkih elemenata i prilagođavanjem postojećim prostornim strukturama, terenskim, geološkim i hidrološkim uvjetima. Kriteriji za vrednovanje definiraju se na osnovi prethodno postavljenih ciljeva. Rezultat vrednovanja treba biti rang-lista koja daje mogućnost da se izabere jedno varijantno rješenje (kao konačno) ili nekoliko varijantnih rješenja (sužavanje skupa rješenja) koja ispunjavaju unaprijed zadane uvjete u skladu s realnim ograničenjima. U ovom procesu donošenje odluka treba biti objektivno i dokumentirano ili što objektivnije, a s obzirom da potpuna objektivnost ne postoji, veću objektivnost moguće je realizirati primjenom **metoda višekriterijskog odlučivanja**, odnosno metoda diskretnog odlučivanja, u odnosu na jednokriterijske i jednodimenzionalne metode.

Situacija da postoji više varijantnih rješenja trase željezničke pruge i više kriterija za njihovo vrednovanje, od kojih neke treba maksimizirati, a neke minimizirati i koji zbog nesuglasnosti mjernih jedinica nisu usporedivi, znači da će se odluke donositi u konfliktnim uvjetima. Upravo ta činjenica pokazuje da se

za rješavanje takvih problema treba koristiti višekriterijskim odlučivanjem i nekim od metoda koje su razvijene za rješavanje ovako složenih problema. U tom je smislu u ovome radu izabrana metoda **VIKOR** (višekriterijsko kompromisno rangiranje).

Za uspješnu primjenu ove metode u radu su usvojeni sljedeći kriteriji: investicije za izgradnju trase, troškovi upravljanja i održavanja trase, kapacitet - propusna moć trase, posljedice trase na prostorni razvoj i uticaj trase na životnu sredinu. Što se tiče relativnih težina, odnosno težinskih koeficijenata, kao mjere značaja i važnosti svakoga usvojenog kriterija, oni su definirani tako da imaju nekoliko kombinacija vrijednosti odnosno scenarija koji omogućuju provjeru stabilnosti rješenja.

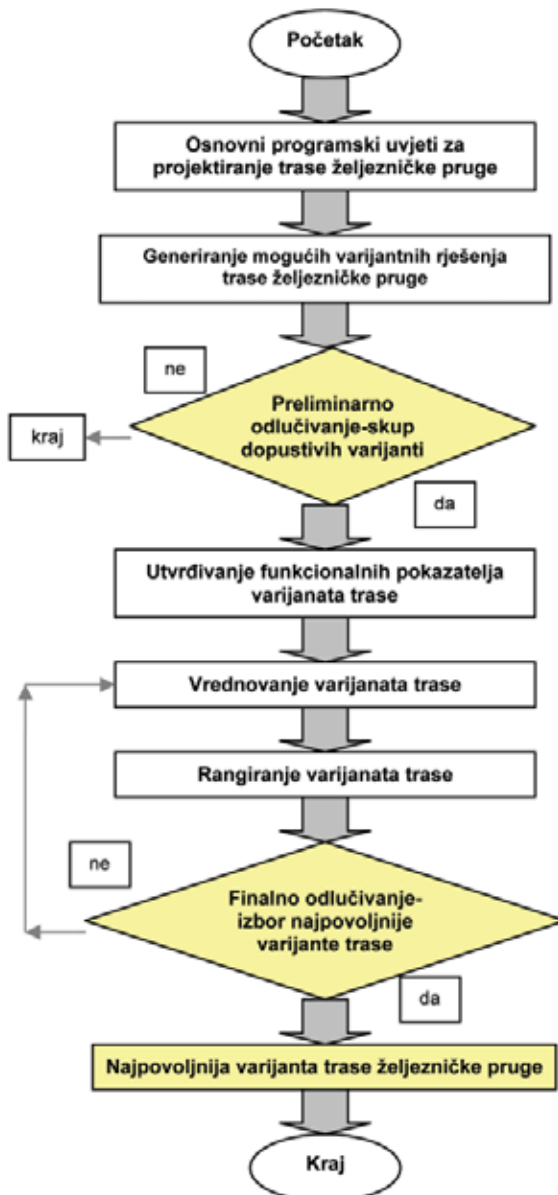
Primjenjivost novopredložene i razvijene metodologije višekriterijskog odlučivanja verificirana je na primjeru izbora jedne od četiriju varijanata (Čortanovci, Maradić, Kombinovana, Kovilj) nove trase dvokolosiječne željezničke pruge, Koridora X na dionici Inđija - Novi Sad. Dobiveni rezultati potvrđuju ispravnost i praktičnu upotrebljivost ove metodologije u rješavanju ovog problema.

## 2. Metodologija planiranja i projektiranja trase željezničke pruge

Mnoge analize, vezane za objekte željezničke infrastrukture nastale u prošlosti, pokazuju česte investicijske promašaje i pojavu negativnih posljedica na elemente životne sredine u toku njihove izgradnje i eksploatacije. Postoji više razloga koji su doveli do ovih pojava, a jedan od njih vezan je za nedostatke tada primjenjivanih metodologija planiranja i projektiranja ovih objekata. Te metodologije zasnivale su se na metodama koje su formirane varijante upoređivale samo na osnovi jednog, finansijsko-ekonomskog kriterija (**planiranih investicija i troškova**), bez potpune spoznaje i vrednovanja ostalih mogućih aspekata ovih objekata [9]. U okviru ovih metodologija, odlučivanje, odnosno donošenje odluka o izboru najpovoljnijeg rješenja, najčešće je bilo subjektivno, iskustveno i nedovoljno dokumentirano obrazloženje rezultata pa i same konačne odluke. Zato su i navedene posljedice takvog pristupa bile neminovne i evidentne.

Radi pronalaženja dugoročnih rješenja u smislu povećanja kvalitete prijevoznih usluga u željezničkom prometu, očuvanja kvalitete životne sredine i racionalnog korištenja svim prirodnim resursima, postoji potreba usavršavanja i primjene složenijih i sveobuhvatnijih metodoloških postupaka i metoda za procjenu i vrednovanje objekata željezničke infrastrukture u procesu njihova planiranja i projektiranja. To je uvjetovalo pokušaj stvaranja nove metodologije prikazane u ovom radu, koja predviđa da se u procesu planiranja i projektiranja novih ili rekonstrukcije postojećih trasa željezničkih pruga, za

procjenu i vrednovanje varijantnih rješenja, osim financijsko-ekonomskog kriterija primjenjuju i tehničko-tehnološki, prometni, prostorni i ekološki kriteriji, a da se za izbor najpovoljnijeg rješenja primjenjuju metode višekriterijskog odlučivanja. Tako se preko skupa ovih kriterija uzimaju u razmatranje sve okolnosti i aspekti koji mogu utjecati na donošenje konačne odluke, pri čemu metode višekriterijskog odlučivanja pokazuju veću objektivnost od klasičnih jednokriterijskih metoda u etapi izbora najpovoljnijeg rješenja. Na ovaj se način istovremeno provodi unapređenje i proširenje postojećih metodologija čime se korisnicima daje mogućnost da izbor metoda obavljaju prema vlastitim sklonostima, vodeći računa da izabrana rješenja budu ona prava – najbolja [1, 2, 5, 10. 19. 21].



Slika 1. Iterativni optimizacijski proces projektiranja trase željezničke pruge

Ova metodologija predviđa primjenu sustavnog pristupa i iterativnog optimizacijskog procesa koji se provodi preko karakterističnih nivoa prikazanih na slici 1. Razlog je za primjenu takvog procesa što željezničke pruge pripadaju skupu diskretnih sistema za čiji opis se ne može formulirati sveobuhvatni matematički model, nego se moraju generirati alternative, odnosno varijantna rješenja trase željezničke pruge. To zahtijeva da se u okviru ovog procesa, na osnovi usvojenog općeg cilja i liste kriterija, primijeni prvo **preliminarno odlučivanje** (rangiranje i izbor dopustivih varijantnih rješenja), a zatim i **finalno odlučivanje** (izbor najpovoljnijeg rješenja). U matematičkom smislu to znači da je za usvojeni cilj, odnosno kriterije i odgovarajuće kriterijske funkcije potrebno odrediti njihove ekstremne vrijednosti, a to je složen postupak koji zahtijeva veliki broj iteracija, različitih etapa i nivoa.

Nakon utvrđivanja osnovnih programskih uvjeta za projektiranje (granične vrijednosti elemenata trase željezničke pruge na planu i profilu, konstruktivni elementi željezničke pruge, sistem vuče i organizacija prometa, kao i sintezna karta ograničenja za trasiranje) prelazi se na generiranje i razradu mogućih varijantnih rješenja trase. Ova aktivnost polazi od glavnog cilja i namjene sistema željezničkih pruga, koji ostaje isti za sva varijantna rješenja, a predviđa da se mijenjaju samo vrijednosti određenih parametara sistema:  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , koji čine vektor  $x$ . Jedna kombinacija vrijednosti vektora  $x$  predstavlja jedno varijantno rješenje  $V_j$ :

$$V_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \quad (1)$$

gdje je:

$V_j$  - j-to varijantno rješenje

$x_{ij}$  - vrijednost i-tog parametra za j-to varijantno rješenje.

Parametri za generiranje varijantnih rješenja mogu biti:

$x_1$  - kategorija željezničke pruge

$x_2$  - mjerodavna brzina

$x_3$  - geometrijski elementi situacijskog i nivelacijskog plana

$x_4$  - elementi poprečnog profila

$x_5$  - prostorni položaj trase

$x_6$  - nivo tehničke opremljenosti pruge

$x_7$  - sistem upravljanja prometom.

Za generiranje varijanti složenih sustava kao što su željezničke pruge ne postoji automatizirani postupak ili model, odnosno ni jedna tehnička, matematička i računalna procedura i pravila ne mogu zamijeniti kreativnost projektanta u stvaranju varijanti. Kako svaka željeznička pruga ima neponovljive uvjete sredine i okruženja, formirane varijante postaju unikati.

Svako definirano rješenje mora biti testirano kako bi se utvrdilo je li ono **dopustivo**. Iz tog se razloga provodi **preliminarno odlučivanje**, koje ima za cilj eliminiranje onih rješenja čiji parametri ne zadovoljavaju unaprijed postavljena ograničenja. Nakon što se utvrde funkcionalne vrijednosti svake dopustive

varijante, prelazi se na njihovo **vrednovanje**. Shodno usvojenom cilju, varijantna se rješenja dokumentirano ocjenjuju i vrednuju prema listi kriterija. Nakon vrednovanja varijanti provodi se njihovo **rangiranje** radi dobivanja redoslijeda, tj. rang-liste. Ako postoji više kombinacija vrijednosti težinskih koeficijenata, odnosno više **scenarija**, tada se za svaki scenarij dobiva odgovarajuća rang-lista. Formirane rang-liste varijanata trase koriste se za **finalno odlučivanje**, izbor jednog (konačnog) varijantnog rješenja ili nekoliko (suženi skup) varijantnih rješenja. Takav pristup i tok aktivnosti u prikazanoj metodologiji omogućava da **odlučivanje** i donošenje konačne odluke o najpovoljnijoj varijanti trase željezničke pruge bude što objektivnije, dovoljno dokumentirano, s prihvatljivim stupnjem minimalnih subjektivnih procjena, uz argumentirano obrazloženje svih rezultata.

### 3. Matematička formulacija metodologije višekriterijskog odlučivanja

Donošenje odluke o izboru najpovoljnije varijante trase u etapi projektiranja željezničke pruge je složen proces i pripada klasi problema višekriterijskog odlučivanja zbog toga što se odluke donose u konfliktnim uvjetima, a što je posljedica:

- postojanja skupa više varijantnih rješenja za izbor,
- postojanja više kriterija različitih (neistoimenih) mjernih jedinica za vrednovanje,
- prisutnosti suprotnosti i konflikta među kriterijima,

Metodologija višekriterijskog odlučivanja izbora trase željezničke pruge, kao diskretnog sistema, karakterizira matrica odlučivanja tipa  $m \times n$ , odnosno matrica s  $m$ -varijantnih rješenja i  $n$ -kriterija ( $m \geq 2$  i  $n \geq 2$ ) što je prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Matrica za višekriterijsko odlučivanje

		Kriteriji					
		$K_1$	$K_2$	...	$K_i$	...	$K_n$
Varijancije	$V_1$	$f_{11}$	$f_{12}$	...	$f_{1i}$	...	$f_{1n}$
	$V_2$	$f_{21}$	$f_{22}$	...	$f_{2i}$	...	$f_{2n}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$V_j$	$f_{j1}$	$f_{j2}$	...	$f_{ji}$	...	$f_{jn}$
	...	...	...	...	...	...	...
	$V_m$	$f_{m1}$	$f_{m2}$	...	$f_{mi}$	...	$f_{mn}$
		$\omega_1$	$\omega_2$	...	$\omega_i$	...	$\omega_n$
		$max$	$min$	...	$max$	...	$min$

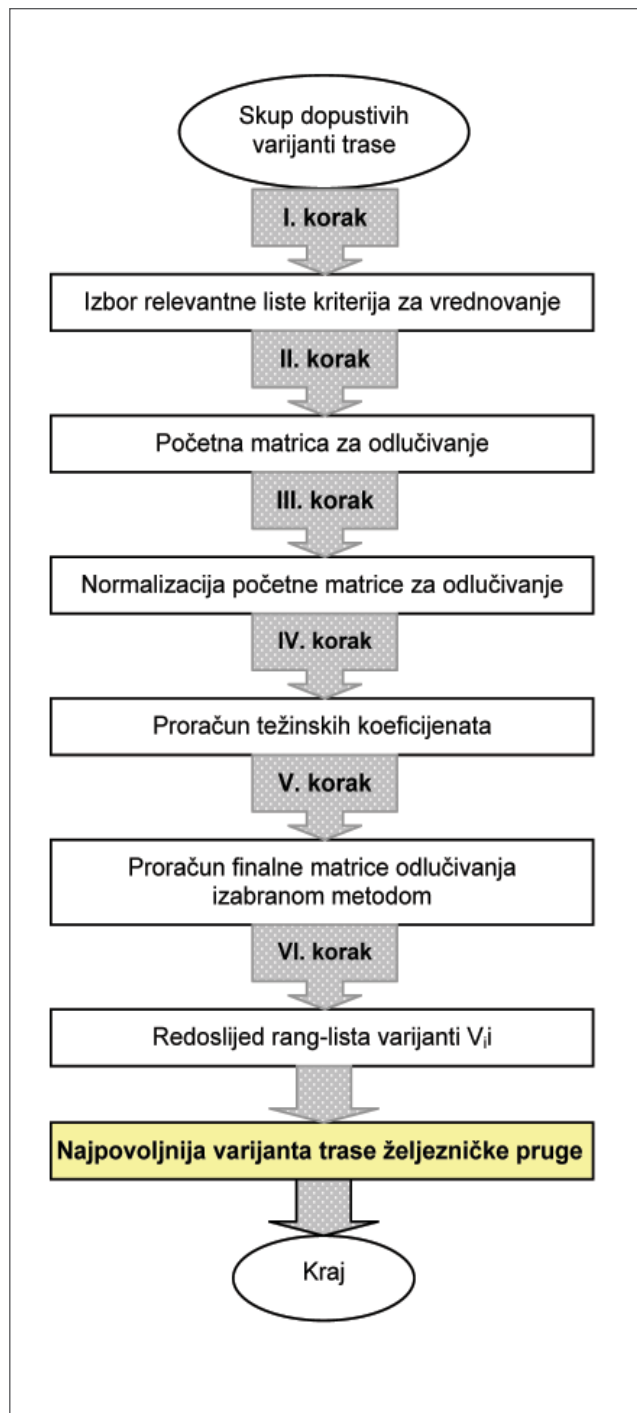
gdje je:

- $V_j$  ( $V_1, V_2, \dots, V_m$ ) - moguća varijantna rješenja trase
- $K_i$  ( $K_1, K_2, \dots, K_n$ ) - izabrani kriteriji za vrednovanje
- $f_{ij}$  ( $f_{11}, f_{12}, \dots, f_{mn}$ ) - vrijednost  $i$ -te kriterijske funkcije za  $j$ -to varijantno rješenje

- $\omega_i$  ( $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ) - težinski koeficijenti kriterija za odlučivanje
- $max$  ili  $min$  - karakteristike kriterijskih funkcija.

#### 3.1. Kriteriji i vrednovanje varijantnih rješenja

Metodologija odlučivanja izbora trase željezničke pruge pretpostavlja formirani skup dopustivih varijantnih rješenja trase i provodi se u nekoliko koraka, slika 2.



Slika 2. Metodologija odlučivanja pri izboru trase željezničke pruge

**Prvi korak** u procesu odlučivanja zahtijeva izbor i usvajanje liste relevantnih kriterija za vrednovanje varijantnih rješenja trase. Usvojenu listu kriterija  $K_j$  ( $j = 1, \dots, 5$ ) čine kvantitativno-ekonomski, kvantitativno-tehnički i kvalitativni kriteriji:

- $K_1$  - investicije za izgradnju trase (novčane jedinice)
- $K_2$  - troškovi upravljanja i održavanja trase (novčane jedinice)
- $K_3$  - kapacitet, tj. propusna moć trase (broj pari vlakova ili broj vlakova po smjeru)
- $K_4$  - posljedice trase na prostorni razvoj (bodovi)
- $K_5$  - utjecaj trase na životnu sredinu (bodovi).

Kriterij  $K_1$  definira **investicije za izgradnju željezničke pruge** i prikazuje se funkcijom  $f_1$  u obliku:

$$f_1 = \sum I = I_{op} + I_{st} + I_{ev} + I_{ss-tk} \quad (\text{novčanih jedinica}) \quad (2)$$

gdje je:

- $I$  - pojedinačne investicije u stabilna postrojenja željezničke pruge
- $I_{op}$  - investicije za izgradnju dionica otvorene pruge
- $I_{st}$  - investicije za izgradnju novih ili rekonstrukciju postojećih stanica
- $I_{ev}$  - investicije za postrojenja električne vuče
- $I_{ss-tk}$  - investicije za SS i TK uređaje.

Kriterij  $K_2$  definira **troškove upravljanja i održavanja pruge** i prikazuje se funkcijom  $f_2$  u obliku:

$$f_2 = \sum T = T_{ops} + T_{oev} + T_{oss-tk} + T_{osu} \quad (\text{novčanih jedinica}) \quad (3)$$

gdje je:

- $T$  - pojedinačna vrijednost troškova za održavanje stabilnih postrojenja i pratećih sadržaja željezničke pruge
- $T_{ops}$  - troškovi za održavanje pruge i stanica
- $T_{oev}$  - troškovi za održavanje postrojenja električne vuče
- $T_{oss-tk}$  - troškovi za održavanje SS i TK uređaja
- $T_{osu}$  - troškovi organizacije prometa i upravljanja.

Kriterij  $K_3$  definira **kapacitet-propusnu moć željezničke pruge** i prikazuje se funkcijom  $f_3$  u obliku:

$$f_3 = N = \frac{T}{I_{sl} + t_r + t_d} = \frac{T}{1,67I_{sl} + 0,25a} \quad \text{broj vlakova} \quad (4)$$

gdje je:

- $N$  - propusna moć trase željezničke pruge
- $T$  - period vremena za koji se proračunava propusna moć
- $I_{sl}$  - srednja vrijednost minimalnog intervala slijeda vlakova na mjerodavnom prostornom razmaku
- $t_r$  - rezervno vrijeme
- $t_d$  - dopunsko vrijeme
- $a$  - broj međustaničnih razmaka na promatranoj dionici.

Prikazana relacija funkcije  $f_3$  rabi se za proračun propusne moći željezničke pruge primjenom metode UIC 406.

Kriterij  $K_4$  definira **posljedice trase na prostorni razvoj** i prikazuje se funkcijom  $f_4$  u obliku:

$$f_4 = \sum P = P_{opc} + P_{zp} + P_{kipn} \quad (\text{bodovi}) \quad (5)$$

gdje je:

- $P$  - pojedinačna vrijednost posljedica trase željezničke pruge na prostorni razvoj
- $P_{opc}$  - očuvanje prostornih cjelina (stanovanje, privredne aktivnosti, odmor i rekreacija)
- $P_{opc}$  - zauzimanje površina (poljoprivredno i građevinsko zemljište)
- $P_{kipn}$  - očuvanje kulturnopovijesnog i prirodnog naslijeđa (spomenici kulture, nacionalni parkovi i pejzaž).

Procjena i vrednovanje navedenih pojedinačnih posljedica ( $P_{opc}$ ,  $P_{opc}$  i  $P_{kipn}$ ) ostvaruje se opisnim ocjenama svih parametara koji definiraju ove posljedice. Opisne se ocjene najčešće iskazuju po modelu: povoljno, uvjetno povoljno i nepovoljno, a zatim se pretvaraju u bodove u rasponu od 1 do 10.

Kriterij  $K_5$  definira **utjecaj trase na životnu sredinu** i prikazuje se funkcijom  $f_5$  u obliku:

$$f_5 = \sum U = U_{b-v} + U_z + U_v + U_{ff} + U_{kmk} \quad (\text{bodovi}) \quad (6)$$

gdje je:

- $U$  - pojedinačna vrijednost utjecaja trase na životnu sredinu
- $U_{b-v}$  - utjecaj buke i vibracija od prometa
- $U_z$  - utjecaj trase željezničke pruge na zemljište
- $U_v$  - utjecaj trase željezničke pruge na vode
- $U_{ff}$  - utjecaj trase željezničke pruge na flor i faunu
- $U_{kmk}$  - utjecaj trase željezničke pruge na klimu i mikroklimu.

Procjena i vrednovanje navedenih utjecaja ostvaruje se bodovima u rasponu od 1 do 5. Od navedenih su kriterija,  $K_1$  i  $K_2$  iskazani kvantitativno (novčanim jedinicama),  $K_3$  kvantitativno (nenovčanim jedinicama), dok su  $K_4$  i  $K_5$  iskazani kvalitativnim jedinicama. U ovom poretku kriterijsku funkciju  $f_3$  treba maksimalizirati, dok ostale kriterijske funkcije  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_4$  i  $f_5$  treba minimizirati.

U **drugom se koraku** procesa odlučivanja svako varijantno rješenje pojedinačno vrednuje prema svakom kriteriju. Tako se formira **početna matrica ( $F_{ij}$ ) za odlučivanje** (tablica 1.).

U **trećem se koraku** procesa odlučivanja provodi normalizacija početne matrice za odlučivanje, odnosno normalizacija vrijednosti kriterijskih funkcija  $f_j$  zbog različitih jedinica mjere, a na osnovi relacija koje su definirane u okviru metode koja će se primijeniti za odlučivanje.



U **četvrtom se koraku** proračunavaju težinski koeficijenti  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) izabranih kriterija. Ovi koeficijenti određuju relativnu važnost svakog kriterija u formiranom poretku kriterija. Mogu se primijeniti normalizirane vrijednosti težinskih koeficijenata i tada za njih vrijedi relacija  $w_i \geq 0$ ,  $\sum w_i = 1$ , ali i nenormalizirane vrijednosti cijelim brojevima ili iznosima u postocima. Za definiranje težinskih koeficijenata mogu se primjenjivati različite metode: Delfi metoda, simulacija strukture preferencije, metoda entropije, metoda vlastitog vektora i druge, a za početne vrijednosti značaja kriterija mogu se uzeti i ocjene iz Satijeve skale [22, 23].

Težinski koeficijenti mogu imati i nekoliko kombinacija vrijednosti, odnosno više scenarija:

**Scenarij I.** - svi kriteriji imaju iste težine,

**Scenarij II.** - veća se težina daje ekonomskim kriterijima,

**Scenarij III.** - veća se težina daje prometnim kriterijima,

**Scenarij IV.** - veća se težina daje prostornim i ekološkim kriterijima.

Ova se kombinacija vrijednosti težinskih koeficijenata – scenarija određuju tako da se pokrije nekoliko karakterističnih struktura preferencije donositelja odluke, ali i da se utvrdi stabilnost konačnog rješenja.

U **petom koraku**, na osnovi relacije koja je definirana u okviru izabrane metode višekriterijskog odlučivanja, provodi se proračun **finalne matrice odlučivanja**.

Posljednji, **šesti korak** u procesu odlučivanja jest rangiranje radi dobivanja rang-liste ili redosljeda varijantnih rješenja. Ako postoji više kombinacija vrijednosti relativnih težina, više scenarija, tada se pri rangiranju za svaki scenarij dobiva odgovarajuća rang-lista. Formirane se rang-liste varijantata trase rabe dalje za **finalno odlučivanje**, odnosno donošenje konačne odluke o izboru jednog varijantnog rješenja (kao konačnog) ili nekoliko varijantnih rješenja (sužavanje skupa rješenja). Krajnji je rezultat ovog procesa višekriterijskog odlučivanja najpovoljnija varijanta trase željezničke pruge.

### 3.2. Klasifikacija metoda višekriterijskog odlučivanja

Veliki je broj metoda razvijen za rješavanje višekriterijskih problema, a njihova je klasifikacija predstavljena u različitim publikacijama [4, 7, 20]. S obzirom na prirodu informacija samih problema, metode **MCDM** (eng. multi criteria decision making) mogu se svrstati u sljedeće grupe:

1. Višeatributivno odlučivanje (eng. multi-attribute decision making) ili kako se u posljednje vrijeme sve više naziva višekriterijska analiza (multi-criteria analysis). Ova grupa metoda rješava višekriterijske probleme izborom najbolje alternative iz skupa prethodno definiranih.
2. Višeciljno odlučivanje (eng. multi-objective decision making). Ova grupa metoda rješava višekriterijske probleme programiranjem najbolje alternative.

Za podršku u složenim procesima donošenja odluka, kao što je donošenje odluka u planiranju i projektiranju trase željezničke pruge, s obzirom na diskretnost sistema, primjenjivat će se metode višeatributivnog odlučivanja, odnosno višekriterijske analize. Postoji nekoliko metoda iz ove grupe koje pripadaju metodama "višeg ranga" i one se mogu podijeliti u sljedeće grupe:

1. metode zasnovane na kompromisu: **TOPSIS** (eng. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), **CP** (kompromisno programiranje), i **VIKOR** (višekriterijsko kompromisno rangiranje),
2. metode korisnosti: Aditivna metoda (**SWA** - *Simple Additive Weighting*), analitički hijerarhijski proces (**AHP** - *Analytic Hierarchy Process*) kao i metode zasnovane na teoriji fuzzy skupova i teoriji igara,
3. **Qutranking metode: ELECTRA I, II, III, IV** (*Elimination and (Et) Choice Translating Reality*), **PROMETHEE I, II, III, IV** (eng. *Preference Ranking Organization METHod of Enrichment Evaluations*).

Kako je u procesu planiranja trase potrebno provesti izbor između više generiranih rješenja, uz prisutnost većeg broja kriterija i različitih mjera, za rješavanje ovog problema izdvaja se prva grupa metoda iz prikazane podjele. Na osnovi karakteristika metoda iz izdvojene grupe, za rješavanje izbora najpovoljnije trase željezničke pruge u ovom radu primjenjivat će se metoda **VIKOR** [16, 17, 18, 19].

### 3.3. Karakteristike izabrane metode VIKOR

Programski je paket VIKOR razvijen za višekriterijsko rangiranje alternativa, a zasnovan je na kompromisnom programiranju. Ova se metoda fokusira na rangiranje i izbor alternativa u prisutnosti konfliktnih kriterija, a pritom se koristi idealnom točkom kao referentnom tačkom u prostoru kriterijskih funkcija. Međutim, ne postoji alternativa koja zadovoljava istovremeno sve kriterije, pa se traži dopustivo rješenje koje je najbliže idealnom u prostoru kriterijskih funkcija. Rješenje koje je najbliže idealnom naziva se kompromisnim rješenjem na osnovi usvojene mjere rastojanja. Kao mjere rastojanja od idealne točke rabe se "granične" metrike  $L_p$  iz metode kompromisnog programiranja, i to mjere  $S_j$  i  $R_j$ :

$$S_j = \frac{\sum w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (7)$$

$$R_j = \max \frac{w_i (f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (8)$$

gdje je:

$f_{ij}$  - vrijednost  $i$ -te kriterijske funkcije za  $j$ -to varijantno rješenje  $i = 1, \dots, n$  i  $j = 1, \dots, m$

$f_i^*$  -  $\max f_{ij}$  ;  $f_i^-$  =  $\min f_{ij}$  ako  $i$ -ta kriterijska funkcija iskazuje dobit, a

$f_i^*$  -  $\min f_{ij}$  i  $f_i^- = \max f_{ij}$ , ako  $i$ -ta kriterijska funkcija iskazuje trošak;  $w_i \geq 0$  su težinski koeficijenti izabranih kriterija

Rangiranjem pomoću mjera  $S_j$  i  $R_j$  određuju se mjesta  $s(V_j)$  i  $r(V_j)$  na rang-listi za varijante  $V_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ . Ovako dobivene rang-liste dosta se razlikuju, pa se tražio dalji postupak za određivanje jedne objedinjene rang-liste. Ova osigurana rang-lista dobiva se na osnovi mjere  $Q_j$ :

$$Q_j = vQS_j + (1-v)QR_j, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

gdje je:

$$QS_j = \frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} \quad \text{i} \quad QR_j = \frac{R_j - R^+}{R^- - R^+};$$

$$S^+ = \max S_j, \quad S^- = \min S_j,$$

$$R^+ = \max R_j, \quad R^- = \min R_j;$$

$v$  - težina strategije odlučivanja "većinom kriterija", a vrijednosti se kreću u intervalu (0, 0,5, i 1).

Varijanta  $V_j$  je višekriterijski bolja od  $V_k$  rangirana pomoću  $Q$ , ako je  $Q_j < Q_k$  i ima višu poziciju na rang-listi. Pozicija na listi  $Q$  dobiva se spajanjem pozicija na listama  $QR$  i  $QS$ . Rangiranje se obavlja sortiranjem varijanti prema vrijednostima mjera  $QS$ ,  $QR$  i  $Q$ . Najbolja varijanta je ona za koju je vrijednost mjere najmanja i ona zauzima prvo mjesto na rang-listi. Mjera  $Q_j$  je linearna funkcija težine strategije "zadovoljenja većine kriterija"  $v$ , pa je pozicija na listi  $Q$  "linearna kombinacija" pozicija na listama  $QS$  i  $QR$ . Stabilnost pozicije varijante na rang-listi analizira se promjenom vrijednosti težinskih koeficijenata.

Metoda VIKOR predlaže kao višekriterijski najbolju onu varijantu (za usvojene vrijednosti  $w_j$ ) koja je na prvoj poziciji na kompromisnoj rang-listi za  $v = 0,5$  samo ako ima:

- "dovoljnu prednost" nad varijantom sa sljedeće pozicije (uvjet U1),
- "dovoljno stabilnu" poziciju s promjenom težine  $v$  (uvjet U2).

Za vrednovanje "prednosti" koristi se razlika između mjera  $Q$ , za  $v = 0,5$ . Varijanta  $V^*$  ima dovoljnu prednost pred sljedećom  $V^m$ 's rang-liste ako je:

$$Q(V^*) - Q(V^m) \geq DQ, \quad (10)$$

gdje je  $DQ$  "prag prednosti" koji se određuje u odnosu na teorijske vrijednosti  $Q$ ,  $Q_{max} - Q_{min} = 1 - 0$ , i broj varijanti  $m$ :

$$DQ = \min(0,25; \frac{1}{m-1}) \quad (11)$$

S 0,25 ograničen je prag za slučajeve s malim brojem varijanti. Uvjet "dovoljne prednosti" omogućava da se donosiocu odluke prikažu sve varijante koje su "bliske" u višekriterijskom smislu.

Ne bi bilo opravdano da se donosiocu odluke prikaže samo varijanta s prve pozicije na rang-listi prema mjeri  $Q$  i da se zanemare varijante koje imaju njoj "bliske" vrijednosti mjere  $Q$ . Prva varijanta na rang-listi ima "dovoljno stabilnu" poziciju ako ispunjava bar jedan od sljedećih uvjeta:

- ima prvu poziciju na rang-listi prema  $Q$  za  $v = 0,25$  i  $v = 0,75$ ,
- ima prvu poziciju na rang-listi prema  $QS$ ,
- ima prvu poziciju na rang-listi prema  $QR$ .

Ako prva varijanta s kompromisne rang-liste ne ispunjava oba uvjeta  $U1$  i  $U2$  smatra se da ona nije dovoljno bolja od varijante s druge pozicije. U takvim slučajevima metodom VIKOR formira se skup kompromisnih rješenja u koji ulaze prva varijanta i varijanta iza nje. Ako prva varijanta ne ispunjava samo uvjet  $U2$  onda u skup kompromisnih rješenja ulazi samo druga s kompromisne liste. Međutim, ako ne ispunjava samo uvjet  $U1$  tada skup kompromisnih rješenja sadrži varijante s kompromisne rang-liste  $V$  i  $V^1, \dots, V^k$  za koje je  $Q(V^k) - Q(V) < DQ$ .

#### 4. Izbor optimalne varijante trase željezničke pruge primjenom metodologije višekriterijskog odlučivanja

Željezničke pruge su složeni infrastrukturni objekti i njihova izgradnja ili rekonstrukcija zahtijeva velike investicije. S druge strane, provođenje suvremene koncepcije razvoja prometnih sustava i dugoročnog plana za unapređenje željezničke mreže, traži da se primijene najnovija projektantska i suvremena tehnološka rješenja. Imajući sve to na umu, veoma je važno da se u procesu projektiranja i procjene rješenja trase željezničke pruge izabere što je moguće racionalnije rješenje, a da pri tome ono jamči kvalitetu koja mora ispuniti suvremenu prometnu infrastrukturu.

U ovom se radu analizira projekt trase dvokolosiječne pruge na dionici između stanica Inđija i Novi Sad. Ova dionica pripada Koridoru X koji prolazi kroz Republiku Srbiju [8].

##### 4.1. Generiranje i vrednovanje varijantnih rešenja trase

S obzirom na prostorni raspored (postojeća naselja, Nacionalni park "Fruška gora" i rijeka Dunav) i lokalne geološke pokazatelje, na ovoj se dionici ukazala mogućnost formiranja četiriju novih varijantnih rješenja trase željezničke pruge  $V_j$  ( $j = 1, \dots, 4$ ) od kojih su tri rješenja pokraj desne i jedno pokraj lijeve obale Dunava. Osnovne karakteristike ovih rješenja jesu:

- **Varijanta  $V_1$  - Čortanovci** – od Inđije do Beške prati postojeću prugu, a zatim skreće prema višim obroncima Fruške gore, odakle se spušta do Sremskih Karlovaca i Petrovaradina i preko novog mosta na Dunavu ulazi u stanicu Novi Sad. Dužina je ove trase 32.455 m, pri čemu na dužinu tunela i mostova otpada 7735 m.
- **Varijanta  $V_2$  - Maradić** – iza stanice Inđija odmah napušta koridor postojeće pruge i skreće prema Maradiću, a zatim se spušta prema Petrovaradinu, pri čemu sa tri tunela prolazi kroz obronke Fruške gore. Ulazak u stanicu Novi Sad je isti

kao i kod varijante Čortanovci. Dužina je ove trase 32.010 m, od kojih je dužina tunela i mostova 8430 m.

- **Varijanta V<sub>3</sub> - Kombinirana** - od stanice Inđija do stanice Čortanovci poklapa se s varijantom Čortanovci, a zatim skreće lijevo prema obroncima Fruške gore i kod Sremskih Karlovaca se uklapa u trasu varijante Maradik. Dužina je ove trase 32.605 m, od kojih je dužina tunela i mostova 9440m.
- **Varijanta V<sub>4</sub> - Kovilj** - napušta koridor postojeće pruge ispred Beške, zatim skreće desno odakle se tunelom spušta i mostom prelazi Dunav da bi u nastavku pratila koridor autoceste Beograd-Subotica. Mostom preko kanala DTD (Dunav-Tisa-Dunav) ulazi u stanicu Novi Sad. Dužina je ove trase 39.800 m, od kojih na tunele i mostove otpada 5160 m.

Procjena i vrednovanje navedenih varijantnih rješenja trase V<sub>j</sub> (j = 1, ..., 4) provedeno je u skladu s kriterijima usvojenim u poglavlju 3.1, na sljedeći način:

1. Vrijednosti kriterijskih funkcija **f<sub>1</sub>** i **f<sub>2</sub>** dobivene su na osnovi zbroja pojedinačnih parametara, preuzetih iz projektne dokumentacije promatranih trasa, koji čine ove funkcije.
2. Vrijednosti kriterijske funkcije **f<sub>3</sub>** dobivene su na osnovi provedenih simulacijskih analiza za promatrane varijante trase pod istim unaprijed definiranim uvjetima. Pri ovom istraživanju promjeni su bili izloženi pojedinačni prometno-tehnološki parametri kao što su: ukupan broj i struktura vlakova, organizacija prometa i brzine kretanja vlakova.
3. Vrijednosti kriterijske funkcije **f<sub>4</sub>** dobivene su na osnovi zbroja svih pojedinačnih parametara koji definiraju svaki utjecaj ( $P_{opci}$ ,  $P_{zp}$  i  $P_{kripni}$ ), a to su: stanovanje, privredne aktivnosti, odmor i rekreacija, poljoprivredno i građevinsko zemljište, spomenici kulture, prirodni rezervati i pejzaž, za svaku varijantu trase. Vrijednosti navedenih parametara utvrđene su nakon statističke obrade anketnih podataka dobivenih na osnovi ocjena eksperata za dano područje. Ove ocjene nisu imale samo opisni karakter: povoljno, uvjetno povoljno i nepovoljno, već i numeričko-bodovni od 1 do 10.
4. Vrijednosti kriterijske funkcije **f<sub>5</sub>** dobivene su na osnovi zbroja svih utjecaja na životnu sredinu ( $U_{b-v}$ ,  $U_z$ ,  $U_v$ ,  $U_{ff}$  i  $U_{kmi}$ ). I kod ove su funkcije vrijednosti navedenih utjecaja utvrđene nakon statističke obrade anketnih podataka dobivenih na osnovi ocjena eksperata za dano područje. Ove su ocjene imale samo numeričko-bodovni karakter u rasponu od 1 do 5.

Pri obradi anketnih podataka bili su uključeni suradnici izrade projektne dokumentacije iz određenog područja i nekoliko nezavisnih eksperata sa strane, među kojima su bili i neki od autora ovog rada. Izračunane vrijednosti kriterijskih funkcija **f<sub>j</sub>** za usvojene kriterije **K<sub>i</sub>** (i= 1, ..., 5) za vrednovanje formiranih

varijantnih trasa željezničke pruge V<sub>j</sub> (j=1, ...4) prikazane su u tablici 2. Tako je formirana početna matrica (**F<sub>j</sub>**) za odlučivanje.

Tablica 2. Početna matrica za odlučivanje

Kriteriji \ Varijante	K <sub>1</sub> (mil. \$)	K <sub>2</sub> (mil. \$/god)	K <sub>3</sub> (broj vlakova)	K <sub>4</sub> (bodovi)	K <sub>5</sub> (bodovi)
	min	min	max	min	min
V <sub>1</sub>	212,12	20,2	106	35	18
V <sub>2</sub>	223,05	19,6	107	36	12
V <sub>3</sub>	250,05	19,8	106	30	11
V <sub>4</sub>	229,88	23,6	103	44	8

Podaci u tablici 2. pokazuju da nema varijante kod koje su sve vrijednosti kriterijskih funkcija najbolje. Iz tih razloga i zbog različitih jedinica mjere kriterijskih funkcija, početna matrica (**F<sub>j</sub>**) za odlučivanje normalizira se na osnovi relacije (12), a rezultati su prikazani u tablici 3. Transformacija se postiže dijeljenjem s dužinom opsega (dužinom intervala vrijednosti) kriterijske funkcije. Dužina opsega i-te kriterijske funkcije je **D<sub>i</sub>** = **f<sub>i</sub><sup>\*</sup>** - **f<sub>i</sub><sup>-</sup>**, gdje za svaki i-ti kriterij **f<sub>i</sub><sup>\*</sup>** odgovara najboljoj varijanti sistema, a **f<sub>i</sub><sup>-</sup>** najlošijoj.

$$d_{ij} = T(f_i^* - f_{ij}) = \frac{f_i^* - f_{ij}}{D_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m \tag{12}$$

Tablica 3. Normalizacija početne matrice za odlučivanje

Kriteriji \ Parametri	K <sub>1</sub> (mil. \$)	K <sub>2</sub> (mil. \$/god)	K <sub>3</sub> (broj vlakova)	K <sub>4</sub> (bodovi)	K <sub>5</sub> (bodovi)
	min	min	max	min	min
V <sub>1</sub>	0	0,15	0,25	0,36	1
V <sub>2</sub>	0,29	0	0	0,43	0,40
V <sub>3</sub>	1	0,05	0,25	0	0,30
V <sub>4</sub>	0,47	1	1	1	0
<b>f<sub>1</sub><sup>*</sup></b>	212,12	19,6	107	30	8
<b>f<sub>1</sub><sup>-</sup></b>	250,05	23,6	103	44	18
<b>D<sub>i</sub></b>	-37,93	-4	4	-14	-10

Za dalju realizaciju višekriterijskog odlučivanja potrebno je svim kriterijima dodijeliti relativne težine, odnosno težinske koeficijente koji determiniraju njihov značaj. Kao i pri ocjeni kriterijskih funkcija **f<sub>4</sub>** i **f<sub>5</sub>** i ove su vrijednosti utvrđene na osnovi obrade anketnih podataka, a same relativne težine imale su samo numeričko-bodovni karakter u rasponu od 1 do 3. U anketu za ocjenu vrijednosti ovog kriterija bili su

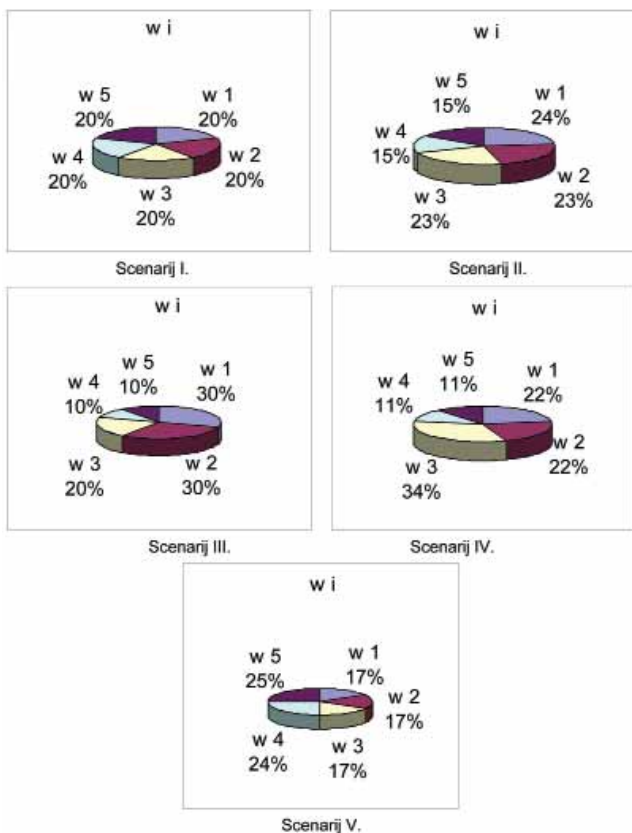


uključeni eksperti iz različitih područja (projektiranja, ekologije, ekonomije, urbanizma i prometa) bilo da su sudionici izrade projektne dokumentacije ili nezavisni eksperti sa strane, među kojima su bili i neki od autora ovog rada.

Nakon statističke obrade provedene ankete i dobivenih rezultata za vrijednosti težinskih koeficijenata svih kriterija predloženo je pet scenarija:

- **Scenarij I.** - svi kriteriji imaju istu važnost, tako da imaju iste težinske koeficijente,
- **Scenarij II.** - prednost se daje ekonomskom i prometnom aspektu, tako da je najveća vrijednost težinskih koeficijenata dodijeljena kriterijima  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$ , a najmanja kriterijima  $K_4$  i  $K_5$ ,
- **Scenarij III.** - prednost se daje ekonomskom aspektu, tako da je najveća vrijednost težinskih koeficijenata dodijeljena kriterijima  $K_1$  i  $K_2$ , a najmanja kriterijima  $K_4$  i  $K_5$ ,
- **Scenarij IV.** - prednost se daje prometnom aspektu, tako da je najveća vrijednost težinskog koeficijenta dodijeljena kriteriju  $K_3$ , a najmanja kriterijima  $K_4$  i  $K_5$ ,
- **Scenarij V.** - prednost se daje ekološkom aspektu, tako da je najveća vrijednost težinskih koeficijenata dodijeljena kriterijima  $K_4$  i  $K_5$ , a najmanja kriterijima  $K_1$ ,  $K_2$  i  $K_3$ .

Nenormalizirane vrijednosti težinskih koeficijenata, za predložene moguće scenarije prikazane su u tablici 4. i na slici 3.



Slika 3. Grafički prikaz nenormaliziranih vrijednosti težinskih koeficijenata za predložene scenarije

Tablica 4. Nenormalizirane vrijednosti težinskih koeficijenata za predložene scenarije

Težinski koeficijenti	Scenariji				
	SC I	SC II	SC III	SC IV	SC V
w1	1	3	3	2	2
w2	1	3	3	2	2
w3	1	3	2	3	2
w4	1	2	1	1	3
w5	1	2	1	1	3

#### 4.2. Finalna matrica za odlučivanje i rang-liste

Na osnovi vrednovanja po kriterijima i definiranim scenarijima težinskih koeficijenata i na osnovi izraza (7), (8) i (9) programskog paketa VIKOR i usvojenih težina strategije odlučivanja "većinom kriterija"  $\nu = 0,5$ , dobivena je sljedeća **finalna matrica za odlučivanje** i rang-liste (tablice 5. i 6.):

Tablica 5. Matrice za odlučivanje na osnovi mjera Qj, QSj i QRj

Scenariji	Mjere	Varijante trase			
		V1	V2	V3	V4
Scenarij I.	Qj	0,636	0	0,602	1
	QSj	0,272	0	0,204	1
	QRj	1	0	1	1
Scenarij II.	Qj	0,366	0	0,643	1
	QSj	0,201	0	0,286	1
	QRj	0,531	0	1	1
Scenarij III.	Qj	0,084	0	0,697	1
	QSj	0,107	0	0,394	1
	QRj	0,061	0	1	1
Scenarij IV.	Qj	0,177	0	0,451	1
	QSj	0,181	0	0,315	1
	QRj	0,174	0	0,587	1
Scenarij V.	Qj	0,686	0	0,252	1
	QSj	0,372	0	0,088	1
	QRj	1	0	0,415	1

Tablica 6. Rang-liste varijanti trase za predložene scenarije i  $v = 0,5$ 

Rang	Scenariji				
	SC I	SC II	SC III	SC IV	SC V
1	V2(0)	V2(0)	V2(0)	V2(0)	V2(0)
2	V3 (0,602)	V1 (0,366)	V1 (0,084)	V1 (0,177)	V3 (0,252)
3	V1 (0,636)	V3 (0,643)	V3 (0,697)	V3 (0,451)	V1 (0,686)
4	V4 (1)	V4 (1)	V4 (1)	V4 (1)	V4 (1)

### 4.3. Analiza rezultata

Rezultati provedenog višekriterijskog rangiranja metodom VIKOR (tablica 6.) pokazuju da je varijanta  $V_2$  (Maradik) uvijek prva po rang-u te se predlaže kao kompromisno rješenje. U slučaju kada se prednost daje ekonomskim odnosno prometnim kriterijima postoji skup kompromisnih rješenja, a to su varijanta  $V_2$  (Maradik) i varijanta  $V_1$  (Čortanovci). Ovako dobiveni rezultati ponudit će se donosiocima odluke u postupku odlučivanja za rješenje izbora najpovoljnije trase željezničke pruge na dionici između stanice Inđija i stanice Novi Sad. Koje od ovih rješenja će izabrati donosioci odluke zavisi od scenarija koji će prihvatiti. Ako su to scenariji I., II. i V., tada se varijanta Maradik predlaže kao kompromisno rješenje (ispunjen uvjet  $U1$  i  $U2$ ), a u slučaju scenarija III. i IV., predlaže se skup kompromisnih rješenja, varijante Maradik i Čortanovci, (ispunjen uvjet  $U2$ , a nije ispunjen uvjet  $U1$ ), zbog čega slijede dodatne analize i proračuni samo ovih rešenja. U ponovljenom rangiranju ovih rješenja utvrdit će se prednosti i nedostaci svake od njih, pa će se tako odabrati

najpovoljnije kompromisno rješenje. U ovom radu taj postupak nije prikazan.

### 5. Zaključak

Predložena metodologija višekriterijskog odlučivanja omogućava cjelovito i sistemsko rješavanje problema izbora najpovoljnije trase željezničke pruge u procesu planiranja i projektiranja i predstavlja podršku donosiocima konačne odluke u procesu odlučivanja. Ovom se metodologijom trasa željezničke pruge vrednuje preko više kriterijskih funkcija (investicije, troškovi, kapacitet, posljedice na prostorni razvoj i utjecaj na životnu sredinu). Varijante trase generiraju se preko različitih vrijednosti konstruktivnih i eksploatacijskih parametara sistema. Za rangiranje se primjenjuju metode višekriterijske analize. Više scenarija vrijednosti težinskih koeficijenata omogućava provjeru stabilnosti varijanti na rang-listama. Krajnji je rezultat višekriterijskog odlučivanja prijedlog najpovoljnije trase, a ona treba predstaviti najbolje rješenje iz skupa definiranih dopustivih rješenja u skladu s usvojenim kriterijima i realnim ograničenjima. Dobiveni su rezultati u prikazanom primjeru pokazali ispravnost ove metodologije, njezinu praktičnu primjenu, jer predstavljaju pomoć i podršku u odlučivanju. Ona se može uspješno primjenjivati u rješavanju problema izbora i trasa i drugih objekata željezničke infrastrukture.

### Zahvala

Ovaj je rad izrađen uz podršku *Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije* u okviru tehnološkog projekta, evidencijski broj 36012: "Istraživanje tehničko-tehnološke, kadrovske i organizacijske osposobljenosti Željeznica Srbije s aspekta sadašnjih i budućih zahtjeva Europske Unije".

## LITERATURA

- [1] Ballester, E.; Antón, J. M.; Bielza, C.: *Compromise-Based Approach to Road Project Selection in Madrid Metropolitan Area*, Journal of the Operations Research Society of Japan, 46(2003)1, 99-122.
- [2] Banai, R.: *Public Transportation Decision-Making: A Case Analysis of the Memphis Light Rail Corridor and Route Selection with Analytic Hierarchy Process*, Journal of Public Transportation, 9 (2006) 2, 1-24.
- [3] Barić, D.; Radačić, Ž.; Čurepić, D.: *Implementation of multi-criteria decision-making method in selecting the railway line for reconstruction*, ICTS 2006 Transportation Logistics in Science and Practice, Proceedings / Portorož, 2006.
- [4] Borović, S.; Nikolić, I.: *Višekriterijumska optimizacija: metode, primena u logistici, softver*, Centar vojnih škola Vojske Jugoslavije, Beograd, 1996.
- [5] Brauers, W. K.; Peldschus, P.; Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.: *Multi-Objective Optimization of Road Design Alternatives with an Application of the MOORA Method*, The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, June 2008, 541-548.
- [6] Cristóbal, J. R. S.; Biezma, M. V.; Martínez R.; Somoza, R.: *Selection of materials under aggressive environments: The VIKOR method*, 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto/Portugal, July 2009.
- [7] Čupić, E. M.; Rao Tummala, V.T.: *Savremeno odlučivanje-Metode i primena*, Naučna knjiga, Beograd, 1997.
- [8] *Studija podobnosti modernizacije željezničke pruge Subotica-Beograd-Niš-Dimitrovgrad*: Bankarski dosije, Saobraćajni institut CIP, Sofrereil Paris, Beograd, 1991.

- [9] Jha, M.; Schonfeld, P.; Samanta, S.: *Optimizing Rail Transit Routes with Genetic Algorithms and GIS*, Journal of Urban Planning and Development, 133(2007.)3, 161-171.
- [10] Kalamaras, G. S.; Brino, L.; Carrieri, G.; Pline, C.; Grasso, P.: *Application of Multicriteria Analysis to Select the Best Highway Alignment, Tunelling and Underground Space Technology*, 15(2000.)4, 415-420.
- [11] Karleuša, B.; Ožanić, N.: *Određivanje prioriteta u realizaciji vodnogospodarskih planova*, Građevinar 63 (2011.) 2, 151-161.
- [12] Kosijer, M.; Ivić, M.: *Primena višekriterijumske optimizacije pri izboru optimalnog koridora železničkih pruga*, Železnice, 7-9 (1997.), 368-372.
- [13] Kosijer, M.: *Prilog metodologiji vrednovanja varijanata pruga za velike brzine na nivou generalnog projekta*, magistarski rad, Građevinski fakultet, Beograd, 1995.
- [14] Margeta, J.; Prskalo, G.: *Izbor lokacije za sanitarno odlagalište*, Građevinar 58 (2006) 12, 997-1008.
- [15] Mladineo, N.; i dr.: *Izbor trase jadranske autoceste primjenom metode višekriterijalne analize*, Zbornik radova SYM-OP-IS 1990, Kupari, 651-654.
- [16] Opricovic, S.: *A compromise solution in water resources planing*, Water Resour Manage, 23 (2009), 1549-1561.
- [17] Opricovic, S.; Tzeng, G-H.: *A comparative analysis of the DEA-CCR model and the VIKOR method*, Yugoslav Journal of Operational Research, 18 (2008), 87-93.
- [18] Opricovic, S.; Tzeng, G-H.: *Extended VIKOR method in comparison with outranking methods*, European Journal of Operational Research, 178 (2007), 514-529.
- [19] Opricovic, S.; Tzeng, G-H.: *Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS*, European Journal of Operational Research, 156 (2004), 445-455.
- [20] Opricović, S.: *Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu*, Građevinski fakultet, Beograd, 1998.
- [21] Roy, B.; Hugonnard, J. C.: *Ranking of Suburban Line Extension Projects on the Paris Metro System by a Multicriteria Method*, Transportation Research-A, 16A, 4 (1982), 301-312.
- [22] Saaty, T. L.: *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*, European Journal of Operational Research, 48 (1990), 9-26.
- [23] Saaty, T. L.: *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with AHP*, Pittsburgh: RWS Publications, 1994.