

Primljen / Received: 11.7.2018.

Ispravljen / Corrected: 25.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 11.3.2019.

Dostupno online / Available online: 10.5.2020.

# Neizrazito višekriterijsko odlučivanje u planiranju i projektiranju željezničke infrastrukture

## Autori:



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Milana Kosijer**  
[m.kosijer@sf.bg.ac.rs](mailto:m.kosijer@sf.bg.ac.rs)



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Miloš Ivić**  
[m.ivic@sf.bg.ac.rs](mailto:m.ivic@sf.bg.ac.rs)



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Ivan Belošević**  
[i.belosevic@sf.bg.ac.rs](mailto:i.belosevic@sf.bg.ac.rs)  
Autor za korespondenciju



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Norbert Pavlović**  
[norbert@sf.bg.ac.rs](mailto:norbert@sf.bg.ac.rs)



<sup>2</sup>**Marija Opricović**, dipl.eoc.  
[marija.opricovic@nbs.rs](mailto:marija.opricovic@nbs.rs)

<sup>1</sup>Sveučilište u Beogradu, Srbija  
Prometni fakultet

<sup>2</sup>Narodna Banka Srbije

Prethodno priopćenje

**Milana Kosijer, Miloš Ivić, Ivan Belošević, Norbert Pavlović, Marija Opricović**

## Neizrazito višekriterijsko odlučivanje u planiranju i projektiranju željezničke infrastrukture

U radu je prikazan pristup neizrazitog višekriterijskog odlučivanja u procesu planiranja i projektiranja željezničke infrastrukture koji omogućava cjelovito i sustavno rješavanje problema postojanja faktora neizvjesnosti i neodređenosti prilikom procjene vrijednosti kriterijskih funkcija. Predloženi pristup višekriterijskog odlučivanja je predstavljen u okviru metodologije za izbor najpovoljnije trase dvokolosiječne željezničke pruge. Za vrednovanje varijantnih rješenja trase u radu su upotrebljeni trouglasti neizraziti brojevi, a za rangiranje je primijenjena neizrazita VIKOR metoda.

### Ključne riječi:

željeznička infrastruktura, planiranje i projektiranje, višekriterijsko odlučivanje, neizrazita VIKOR metoda

Research paper

**Milana Kosijer, Miloš Ivić, Ivan Belošević, Norbert Pavlović, Marija Opricović**

## Fuzzy multicriteria decision-making in railway infrastructure planning and design

A fuzzy multicriteria approach in the railway infrastructure planning and design, enabling an integrated and systematic solving of uncertainty and indeterminacy problems in the evaluation of criteria functions, is presented in paper. The proposed multicriteria decision making approach is presented in the scope of the methodology for selecting the most favourable route of a double track railway. Triangular fuzzy numbers are used to evaluate variant solutions, while the VIKOR fuzzy method is used for route ranking.

### Key words:

railway infrastructure, planning and design, multicriteria decision-making, fuzzy VIKOR method

Vorherige Mitteilung

**Milana Kosijer, Miloš Ivić, Ivan Belošević, Norbert Pavlović, Marija Opricović**

## Vage Entscheidungsfindung nach mehreren Kriterien bei der Planung und Projektierung der Eisenbahninfrastruktur

In der Abhandlung wird ein Ansatz der vagen Entscheidungsfindung nach mehreren Kriterien im Prozess der Planung und Projektierung der Eisenbahninfrastruktur präsentiert, der eine vollständige und systematische Lösung des Problems des Vorhandenseins von Unwägbarkeits- und Unbestimmbarkeitsfaktoren bei der Beurteilung des Wertes der Kriteriumsfunctonen ermöglicht. Der vorgeschlagene Ansatz der Entscheidungsfindung nach mehreren Kriterien wird im Rahmen der Methodik für die Auswahl der günstigsten Trasse der zweigleisigen Eisenbahnstrecke vorgestellt. Für die Bewertung der Lösungsvarianten der Trasse wurden in der Abhandlung dreieckige vage Zahlen und für die Festlegung der Rangfolge wurde die vage VIKOR Methode verwendet.

### Schlüsselwörter:

Eisenbahninfrastruktur, Planung und Projektierung, Entscheidungsfindung nach mehreren Kriterien, vage VIKOR Methode

## 1. Uvod

Planiranje i projektiranje željezničke infrastrukture temelji se na važnim odlukama koje je potrebno donijeti kako bi se riješili mnogobrojni problemi vezani za izgradnju novih ili rekonstrukciju postojećih objekata. Nakon definiranja problema i generiranja varijantnih rješenja, provodi se njihovo vrednovanje i izbor najpovoljnijeg rješenja. Tehnička ispravnost i troškovna učinkovitost predstavljaju važan aspekt, ali ne i jedini imperativ vrednovanja projekata u cjelokupnom području prometne infrastrukture. Prilikom vrednovanja varijantnih rješenja potrebno je razmotriti njihove uporabne karakteristike i funkcionalnost, kao i njihov širi društveno - ekonomski kontekst uzimajući u obzir različite eksterne efekte. Eksterni efekti infrastrukturnih projekata mogu biti pozitivni i negativni. Pozitivni vanjski učinci odnose se na uspostavljanje prometnih veza i doprinos sveukupnom ekonomskom razvoju regije, dok negativni se vanjski učinci odnose na rizik stradanja stanovništva u prometu, poremećaj koherentnog razvoja prostornih struktura i štetni utjecaj na životnu sredinu.

U navedenim okolnostima opravdano je razvijati i primjenjivati metode višeatributivnog odlučivanja, odnosno višekriterijske analize koje su se pokazale kao pogodne tehnike za rješavanje problema odlučivanja. Metodama višekriterijske analize problemi se rješavaju pronalaskom najbolje, odnosno najmanje loše varijante ili skupa dobrih varijanti u odnosu na definirane kriterije i njihove težine. U okviru definiranog skupa, neki kriteriji su kvantitativni, a neki kvalitativni. Također, neke kriterije treba maksimizirati, a neke minimizirati. Kako su kriteriji međusobno neusklađeni i iskazani različitim jedinicama mjere, odluke se donose u konfliktnim uvjetima.

Među brojnim metodama višekriterijske analize izdvojile su se metode AHP (eng. *Analytic Hierarchy Process*), PROMETHEE (eng. *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*), ELECTRE (fra. *ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) i VIKOR (srb. *VlšeKriterijumska Optimizacija i KOmpromisno Rešenje*). Te su metode našle primjenu u rješavanju konkretnih problema vrednovanja varijantnih rješenja projekata željezničke ili cestovne infrastrukture [1-6]. Navedenim metodama problem odlučivanja je modeliran pretpostavljajući izvjesnost atributa, odnosno već formiran skup dopustivih varijantnih rješenja i precizno definirane kriterije i kriterijske funkcije. S druge strane, problem odlučivanja pri vrednovanju varijantnih rješenja projekata željezničke ili cestovne infrastrukture najčešće karakteriziraju kriteriji koji se ne mogu jasno kvantificirati kriterijskom funkcijom i prikazati jednom numeričkom vrijednošću za svako generirano varijantno rješenje. Zapravo, taj problem odlučivanja uključuje faktor neizvjesnosti i neodređenosti prilikom procjene vrijednosti kriterijskih funkcija. Postojanje faktora neizvjesnosti i neodređenosti potvrđuju rezultati *ex-post* analiza velikih infrastrukturnih projekata [7] koje upozoravaju na značajne nepreciznosti u proračunu ukupnih učinaka tih projekata. Rezultati ovih istraživanja temelje se na usporedbi procijenjenih vrijednosti dobivenih u postupku izrade

projekata naspram stvarnih rezultata dobivenih nakon njihove realizacije i puštanja na korištenje.

Spomenuti faktor neizvjesnosti i neodređenosti motivirao nas je da predložimo nov pristup višekriterijskog odlučivanja u planiranju i projektiranju željezničke infrastrukture. Model višekriterijskog odlučivanja koji je primijenjen u okviru metodologije za vrednovanje i izbor najpovoljnije trase željezničke pruge [6] zasniva se na klasičnoj VIKOR metodi. Novopredložena metoda višekriterijskog odlučivanja u planiranju i projektiranju željezničke infrastrukture nadograđuje prethodno spomenuti model teorijom neizrazitih skupova [8], odnosno neizrazitom VIKOR metodom. Teorija neizrazitih skupova predstavlja učinkovit način matematičkog definiranja neizvjesnosti i neodređenosti prisutnih u radu s problemima koji su po svojoj prirodi kompleksni ili su loše definirani i strukturirani. Predloženi neizraziti višekriterijski pristup omogućava prikaz neizvjesnih atributa preko neizrazitih brojeva. Uvođenjem teorije neizrazitih brojeva u višekriterijsku analizu premašuju se identificirani nedostaci klasičnih višekriterijskih metoda i postižu se pouzdaniji rezultati.

Primjenljivost novopredložene metode višekriterijskog odlučivanja u planiranju i projektiranju prikazana je na primjeru trase željezničke pruge. Primjer prikazuje izbor trase dvokolosijske pruge na dionici Koridora Xb, između postaja Inđija i Novi Sad. Koridor Xb uvršten je u Osnovnu transeuropsku prometnu mrežu na prostoru zapadnog Balkana (eng. *TEN-T Core Network in Western Balkans*) i označen je kao produžetak istočnog/istočnomediterranskog koridora (eng. *Orient/East-Med Corridor*). Učinkovitost novopredložene metode verificirana je usporedbom dobivenih rezultata s rezultatima dobivenim primjenom klasičnog višekriterijskog postupka.

## 2. Pregled literature

Osnovni pristup u analizi i ocjeni infrastrukturnih projekata zasniva se na primjeni ekonomskog vrednovanja. U okviru ekonomskog vrednovanja infrastrukturnih projekata najčešće se primjenjuju metode analize troškova i koristi, neto sadašnje vrijednosti ili interne stope rentabilnosti. Ekonomsko vrednovanje projekata stavlja u prvi plan valorizaciju varijantnih rješenja iskazanu u novčanim jedinicama mjere. Nedostaci ovakvog pristupa prije svega se vezuju za nemogućnost monetarnog iskazivanja svih koristi od promatranog projekta i razmatranih varijantnih rješenja. Uočeni nedostaci i ograničenja u primjeni isključivo ekonomskog vrednovanja projekata u području prometa i prometne infrastrukture detaljno su prikazani u radovima, npr. [9-11].

Promatrajući širi društveno - ekonomski kontekst infrastrukturnih projekata, u kojima dominiraju različiti vanjski učinci poput pozitivnih utjecaja na mobilnost stanovništva i gospodarski razvoj ili negativnih utjecaja na prostorne strukture i životnu sredinu, upućuju na opravdanost primjene dodatnih pristupa u analizi i ocjeni tih projekata. S tim u vezi, metode višekriterijske analize su primjenjive u uvjetima kada treba

Tablica 1. Primjena metoda višekriterijske analize u području rangiranja varijantnih rješenja prometne infrastrukture

Literatura i godina objave	Opis problema	Primijenjena metoda
[20], 2000.	Izbor trase autoceste	AHP
[25], 2003.	Izbor trase gradske obilaznice	Bayesov model kompromisnog programiranja
[5], 2004.	Izbor trase željezničke pruge	ELECTRE
[1], 2006.	Izbor koridora gradske željeznice	AHP
[21], 2010.	Izbor koridora gradske željeznice	ANP
[6], 2012.	Izbor trase željezničke pruge	VIKOR
[24], 2015.	Izbor trase željezničke pruge	ELECTRE
[3], 2015.	Izbor projektnog rješenja lokalne ceste	PROMETHEE
[22], 2016.	Izbor trase gradske željeznice	AHP i TOPSIS
[2], 2016.	Izbor projektnog rješenja državne ceste	AHP
[4], 2017.	Izbor trase željezničke pruge	PROMETHEE
[23], 2018.	Izbor projektnog rešenja željezničko-cestovnog prijelaza	AHP
[26], 2018.	Izbor trase željezničke pruge	VIKOR

napraviti izbor između više varijantnih rješenja na osnovi većega broja različitih višedimenzionalnih, kvantitativnih i kvalitativnih kriterija.

U okviru radova [12, 13] dan je pregled literature o prvim primjenama višekriterijske analize u području planiranja prometa i prometne infrastrukture. Primjena višekriterijske analize u ovom području započela je sedamdesetih godina radovima [14, 15] i intenzivno se razvijala osamdesetih godina kroz radove primjerice [16-19]. Među tim radovima, rad [16] predstavlja prvo istraživanje na temu rangiranja varijantata trase linijske infrastrukture. Autori su rangirali varijante produženja prigradskih linija mreže metroa u Parizu primjenjujući ELECTRE metodu. Rangirano je 12 varijantnih rješenja uzimajući u obzir šest kriterija: gustoću naseljenosti u gravitacijskoj zoni metro linija, procijenjeni broj privučenih putnika, investicijske troškove, društveno-ekonomsku stopu povrata projekta, utjecaj na organizaciju sustava javnog prijevoza i utjecaj na daljnji urbanistički razvoj ove metropole. Daljnja istraživanja u području rangiranja varijantnih rješenja željezničke i cestovne infrastrukture izvođena su primjenom različitih metoda višekriterijske analize. Sažet kronološki prikaz tih istraživanja dan je tablici 1.

Najčešće primjenjivana metoda višekriterijske analize je AHP metoda. U radu [20] AHP metoda je primijenjena za rangiranje pet varijantnih rješenja trase autoceste u Južnoj Americi. Također, AHP metoda je primijenjena u radu [1] za izbor najpovoljnijega koridora lakog tračničkog sustava u gradu Memphisu (Tennessee, SAD), a u radu [21] isti je primjer iskorišten za analizu primjene metode ANP (eng. Analytic Network Process) kao nelinearne forme AHP metode. U radu [22] predložen je hibridni model koji kombinira metode AHP i TOPSIS (eng. *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) za izbor trase jednotračničkog (eng. *monorail*) sustava u Ankari (Turska). U radovima [2, 23], AHP metoda je primijenjena za modeliranje problema odlučivanja pri projektiranju dionice državne ceste DB

(Jadranska magistrala), odnosno pri projektiranju željezničko-cestovnog prijelaza Trnava u Zagrebu (Hrvatska).

Osim metode AHP, u literaturi se mogu naći radovi u kojima su primijenjene i druge metode višekriterijske analize. Tako na primjer metoda ELECTRE primijenjena je u radovima [5, 24] za izbor najpovoljnije trase pruge. Autori tih radova su primjenljivost ove metode analizirali na primjerima trasa pruga za vlakove velikih brzina u Španjolskoj i Maleziji.

Metode kompromisnog rangiranja primijenjene su u radovima [6, 25]. U radu [25] primijenjen je Bayesov model odlučivanja za rangiranje pet varijanti cestovnog magistralnog prstena oko Madrida, a u radu [6] primijenjena je VIKOR metoda za rangiranje četiri varijante trase dionice magistralne željezničke pruge u Srbiji. VIKOR metoda zasnovana na lingvističkim ocjenama primijenjena je u radu [26] za vrednovanje varijantnih rješenja u ranoj fazi razvoja infrastrukturnih projekata.

Metoda PROMETHEE primijenjena je u radovima [3, 4]. U radu [3] provedeno je vrednovanje i rangiranje varijantnih rješenja sekundarne cestovne mreže s posebnim osvrtom na sigurnosne kriterije. U radu [4] analizirana je mogućnost željezničkog povezivanja luka Trst, Kopar i Rijeka i dalje s mediteranskim koridorom TEN-T mreže, u okviru čega je provedeno rangiranje varijantnih rješenja trase pruge.

U radovima [3, 6, 25] posebna je pozornost usmjerena na postupak vrednovanja varijantnih rješenja, i to na definiranje kriterijskih funkcija radi objektivne kvantifikacije usvojene liste kriterija, a u radovima [4, 26] primijenjen je pristup utemeljen na subjektivnoj procjeni vrijednosti od strane eksperata.

Novija istraživanja sve više se temelje na primjeni GIS tehnologije (eng. *Geographic Information System* - GIS) i usmjeravaju su na oblikovanje SDSS sustava, odnosno prostornih sustava za podršku pri odlučivanju (eng. *Spatial Decision Support System* - SDSS). SDSS sustave karakterizira automatizacija procesa prikupljanja i obrade podataka kao i sposobnost vizualne reprodukcije generiranih varijantata i rezultata njihovog

vrednovanja. Tako je, na primjer, u radu [27] predstavljen SDSS sustav namijenjen generiranju i vrednovanju varijantata baltičkog koridora koji prolazi kroz Poljsku u sklopu TEN-T mreže. Također, u radu [28] oblikovan je SDSS sustav za izbor najpovoljnijih trasa pruga u sklopu mreže za vlakove velikih brzina koja povezuje gradove Houston, Dallas, San Antonio i Austin na prostoru regije Texas Urban Triangle (SAD).

Sveobuhvatni pregled literature na temu primjene metoda višekriterijske analize u području prometne infrastrukture iskazan je u radu [29] ili u sklopu preglednih radova iz područja teorije odlučivanja s primjenom u građevinarstvu [30-32].

### 3. VIKOR metoda u neizrazitom okruženju

Novopredloženi pristup višekriterijskog odlučivanja u planiranju i projektiranju željezničke infrastrukture baziran je na primjeni VIKOR metode u neizrazitom okruženju. S tim u vezi, ovo poglavlje daje kratak prikaz koncepta VIKOR metode i teorije neizrazitih skupova. Najprije će se predstaviti VIKOR metoda koja je razvijena za višekriterijsko odlučivanje i zasnovana na kompromisnom programiranju. Nakon toga, dat će se postavke teorije neizrazitih skupova i definirati osnovne operacije s neizrazitim brojevima.

#### 3.1. VIKOR metoda

VIKOR metoda je razvijena kao metoda višekriterijskog odlučivanja (VKO) za rješavanje diskretnih problema s konfliktnim i raznorodnim kriterijima [33]. Metoda se zasniva na kompromisnom programiranju kao prihvatljivom pristupu za prevladavanje spomenutih konflikata i raznorodnosti među uspostavljenim kriterijima. Karakteristike VIKOR metode razmatrane su detaljno u radovima [34, 35]. Osim detaljnog prikaza teorijske osnove, u tim se radovima uspoređuje učinkovitost VIKOR metode s nekoliko drugih metoda višekriterijske analize. VIKOR metodom se rangiraju varijante i određuje kompromisno rješenje. Kako najčešće ne postoji varijanta koja je ujedno i najbolja, najpovoljnija po svim kriterijima, ovom metodom traži se dopustivo rješenje koje je najbliže idealnom u prostoru kriterijskih funkcija. Rješenje koje je "najbliže" idealnom naziva se kompromisnim rješenjem na osnovi usvojene mjere odstupanja. Za mjerenje odstupanja od idealnog rješenja koriste se "granične" mjere  $L_p$  metrike kompromisnog programiranja, izraz (1), prema [36]:

$$L_p^j = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \frac{w_i (f_i^* - f_{ij})}{f_i^* - f_i^-} \right]^p \right\}^{1/p} \quad 1 \leq p \leq \infty \quad (1)$$

gdje je:

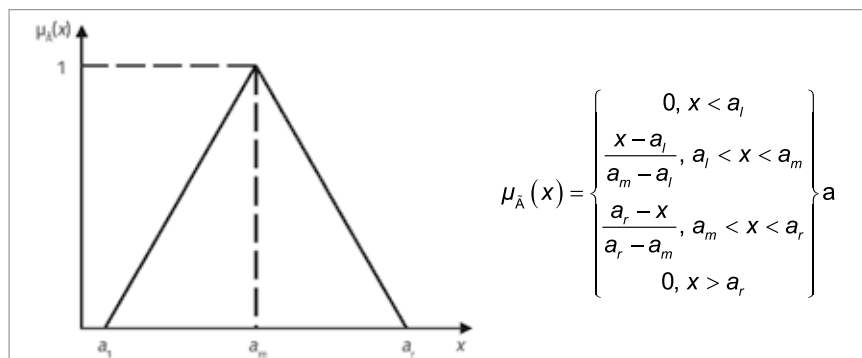
$f_{ij}$  - vrijednost i-te kriterijske funkcije za j-to varijantno rješenje,  $i = 1, \dots, n$  i  $j = 1, \dots, m$

$f_i^+$  i  $f_i^-$  - najbolja i najlošija vrijednost kriterijske funkcije  
 $w_i$  - težinski koeficijenti izabranih kriterija,  $w_i \geq 0$ .

Rješenje dobiveno minimiziranjem mjere  $L_j^1$  (u VIKOR metodi označene kao QS) jest varijanta koja pruža maksimalnu ukupnu korisnost po svim kriterijima, a rješenje dobiveno minimiziranjem mjere  $L_j^\infty$  (u VIKOR metodi označene kao QR) predstavlja varijantu koja pruža maksimalno pojedinačno (individualno) odstupanje po nekom od kriterija. Rang liste dobivene mjerama  $L_j^1$  i  $L_j^\infty$  najčešće se međusobno razlikuju, pa je predložen postupak za određivanje jedne objedinjene rang-liste. Takva lista dobiva se objedinjavanjem mjera  $L_j^1$  i  $L_j^\infty$  pomoću težinskog faktora strategije odlučivanja  $\vartheta$ . Rješenje dobiveno minimiziranjem objedinjene mjere predstavlja kompromis između maksimalne ukupne korisnosti i maksimalnog individualnog odstupanja. Ovako dobiveno rješenje se može prihvatiti ili može biti osnova za daljnje pregovore bazirane na užem skupu varijantnih rješenja koje se po svojim vrijednostima u prostoru kriterijskih funkcija približavaju idealnom rješenju.

#### 3.2. Teorija neizrazitih skupova

Teorija neizrazitih skupova [8] formulirana je s ciljem da se adekvatno riješe problemi koji uključuju faktor neizvjesnosti. Za razliku od klasične teorije skupova koja se bazira na tome da element može pripadati ili ne pripada skupu, teorija neizrazitih skupova omogućava djelomičnu pripadnost nekog elementa skupu. Kao rezultat toga, teorija koristi neizrazite brojeve koji svojom funkcijom pripadnosti matematički iskazuju stupanj neizvjesnosti ili nepreciznosti određenih događaja. Iako postoji više oblika neizrazitih brojeva, među kojima su trouglasti, trapezoidni i Gaussovi brojevi najčešće primijenjeni u literaturi [37-39], u ovom radu su korišteni trouglasti brojevi. Trouglasti brojevi izabrani su za prikaz neizvjesnosti prilikom vrednovanja željezničkih infrastrukturnih projekata zbog svoje jednostavne funkcije pripadnosti linearnog tipa (slika 1.). Trouglasti neizraziti broj može se definirati kao triplet realnih brojeva  $\tilde{A} = (a_l, a_m, a_r)$ , pri čemu je  $a_l \leq a_m \leq a_r$ . Parametar  $a_l$  označava najmanju moguću vrijednost, parametar  $a_m$  najperspektivniju vrijednost (modalna vrijednost), dok parametar  $a_r$  označava najveću moguću vrijednost koja opisuje neizraziti broj. Vrijednost



Slika 1. Trouglasti neizraziti broj  $\tilde{A}$

funkcije pripadnosti  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  predstavlja stupanj pripadnosti elementa  $x$  skupu  $\tilde{A}$ , tako da veća vrijednost  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  označava veću pripadnost elementa  $x$  skupu  $\tilde{A}$ . Osnovne operacije nad trouglastim brojevima  $\tilde{A} = (a, a_m, a_r)$  i  $\tilde{B} = (b, b_m, b_r)$  definiraju se sljedećim izrazima (2) do (7):

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a_i + b, a_m + b_m, a_r + b_r) \quad (2)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_i - b, a_m - b_m, a_r - b_r) \quad (3)$$

$$\tilde{A} \cdot \tilde{B} = (a_i \cdot b, a_m \cdot b_m, a_r \cdot b_r) \quad (4)$$

$$k \cdot \tilde{A} = (k \cdot a_i, k \cdot a_m, k \cdot a_r) \quad (5)$$

$$\max(\tilde{A}, \tilde{B}) = (\max(a_i, b), \max(a_m, b_m), \max(a_r, b_r)) \quad (6)$$

$$\min(\tilde{A}, \tilde{B}) = (\min(a_i, b), \min(a_m, b_m), \min(a_r, b_r)) \quad (7)$$

Transformacija neizrazitih brojeva u odgovarajuće klasične brojeve izvodi se defazifikacijom. U prethodno spomenutoj literaturi [37-39] može se naći više različitih metoda za defazifikaciju, poput centar maksimuma, prosjek maksimuma, centroid metode itd. U ovom radu primijenjena je metoda otežane sredine [40] i to za slučaj vrijednosti parametra  $k = 1$ :

$$x_0(\tilde{A}) = (a_i + k a_m + a_r) / (k + 2) \quad (8)$$

Za slučaj parametra  $k = 1$  ova metoda dobiva formu centroid metode koja klasičnu vrijednost (eng. *crisp value*) broja interpretira kao težište (centar mase):

$$x_0(\tilde{A}) = (a_i + a_m + a_r) / 3 \quad (9)$$

#### 4. Predloženi neizraziti pristup višekriterijskog odlučivanja

Osnovu predloženog pristupa višekriterijskog odlučivanja čini neizrazita VIKOR metoda. Neizrazita VIKOR metoda [40, 41] razvijena je kao neizrazita metoda VKO kako bi riješila diskretni višekriterijski problem s raznorodnim i konfliktnim kriterijima, kao i s kriterijima koji se ne mogu jasno kvantificirati i prikazati jednom numeričkom vrijednošću. Zato se u okviru modela procjena i vrednovanje varijantnih rješenja  $V_j (j = 1, 2, \dots, m)$  prema relevantnim kriterijima  $K_i (i = 1, 2, \dots, n)$  ostvaruje trouglastim neizrazitim brojevima  $f_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, r_{ij})$ . Odabir relevantnih kriterija za vrednovanje varijantnih rješenja provodi se na osnovi općeg cilja koji treba ispuniti željeznička infrastruktura nakon izgradnje, tijekom uporabe. Iz tog razloga opći cilj obuhvaća ekonomski, tehničko-tehnološki, prometno-uporabni i prostorno-ekološki aspekt izgradnje i korištenja željezničke infrastrukture. Izabrani kriteriji se mogu klasificirati na kriterije maksimizirajuće kriterijske funkcije predstavljene skupom  $K^o$  i kriterije okarakterizirane minimizirajućim kriterijskim funkcijama predstavljene skupom  $K^c$ .

Algoritam neizrazite VIKOR metode sastoji se od više koraka:

**Korak 1:** Selekcija najboljih  $\tilde{f}_i^* = (l_i^*, m_i^*, r_i^*)$  i najlošijih  $\tilde{f}_i^- = (l_i^-, m_i^-, r_i^-)$  vrijednosti kriterijskih funkcija:

$$\tilde{f}_i^* = \max_j \tilde{f}_{ij}, \tilde{f}_i^- = \min_j \tilde{f}_{ij} \quad \text{za } i \in K^o \quad (10)$$

$$\tilde{f}_i^* = \min_j \tilde{f}_{ij}, \tilde{f}_i^- = \max_j \tilde{f}_{ij} \quad \text{za } i \in K^c$$

**Korak 2:** Utvrđivanje normalizirane vrijednosti neizrazite mjere

$$\tilde{d}_{ij}, j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{\tilde{f}_i^* - \tilde{f}_{ij}}{r_i^* - l_i^-} \quad \text{za } i \in K^o \quad (11)$$

$$\tilde{d}_{ij} = \frac{\tilde{f}_{ij} - \tilde{f}_i^-}{r_i^- - l_i^+} \quad \text{za } i \in K^c$$

**Korak 3:** Utvrđivanje vrijednosti neizrazite mjere odstupanja  $\tilde{S}_j = (S_j^l, S_j^m, S_j^r)$  i  $\tilde{R}_j = (R_j^l, R_j^m, R_j^r)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  varijanti od idealnog rješenja:

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^n (\tilde{w}_i \cdot \tilde{d}_{ij}) \quad (12)$$

$$\tilde{R}_j = \max_i (\tilde{w}_i \cdot \tilde{d}_{ij}) \quad (13)$$

gdje je  $\tilde{w}_i$  neizraziti težinski koeficijent izabranih kriterija.

**Korak 4:** Utvrđivanje vrijednosti neizrazite mjere odstupanja  $\tilde{Q}_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  varijanti od idealnih rješenja:

$$\tilde{Q}_j = \frac{\vartheta (\tilde{S}_j - \tilde{S}_j^*)}{S^{-r} - S^{-l}} + \frac{(1 - \vartheta) (\tilde{R}_j - \tilde{R}_j^*)}{R^{-r} - R^{-l}} \quad (14)$$

ili skraćeno:

$$\tilde{Q}_j = \vartheta \widetilde{QS}_j + (1 - \vartheta) \widetilde{QR}_j \quad (15)$$

gdje je  $\tilde{S}_j^* = \min \tilde{S}_j$ ,  $\tilde{S}_j^- = \max \tilde{S}_j$ ,  $\tilde{R}_j^* = \min \tilde{R}_j$ ,  $\tilde{R}_j^- = \max \tilde{R}_j$ , a  $\vartheta$  težina strategije odlučivanja "većinom kriterija" čija vrijednost se kreće u intervalu (0, 1).

**Korak 5:** Defazifikacija vrijednosti  $\widetilde{QS}_j$ ,  $\widetilde{QR}_j$  i  $\tilde{Q}_j$  primjenom izraza (9).

**Korak 6:** Formiranje rang listi za defazificirane vrijednosti mjere odstupanja  $QS_j$ ,  $QR_j$  i  $Q_j$ . Rangiranje se izvodi po opadajućim vrijednostima za svaku od mjere odstupanja.

**Korak 7:** Prijedlog kompromisnog rješenja i donošenje konačne odluke o najpovoljnijem varijantnom rješenju.

Da bi neko varijantno rješenje bilo predloženo kao najpovoljnije, nužno je da osim prve pozicije na rang-listi prema mjeri  $Q_j$  zadovolji i uvjete "dovoljne prednosti" (uvjet U1) i "dovoljne stabilnosti" (uvjet U2) [33].

Uvjet "dovoljne prednosti" omogućava da se donositelju odluke prikažu sva varijantna rješenja koja su "bliska" u višekriterijskom smislu. Ne bi bilo opravdano da se donositelju odluke prikaže samo varijanta s prve pozicije na rang-listi prema mjeri  $Q$ , a da se zanemare varijante koje imaju njoj "bliske" vrijednosti mjere  $Q$ .

Prvorangirana varijanta  $V^{(1)}$  imat će dovoljnu prednost nad sljedećom  $V^{(2)}$  s rang-liste ako je zadovoljena nejednakost:

$$Q(V^{(1)}) - Q(V^{(2)}) \geq DQ, \quad DQ = \min\left(0,25; \frac{1}{m-1}\right) \quad (16)$$

Prva varijanta na rang-listi imat će "dovoljno stabilnu" poziciju ako ispunjava bar jedan od sledećih uvjeta:

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

## 5. Primjer izbora trase željezničke pruge u neizrazitom okruženju

Željezničke pruge su složeni prometni 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 konstrukcijska i suvremena tehnološka rješenja. Imajući sve to na umu, veoma je važno da se u procesu projektiranja i procjene rješenja trase željezničke pruge izabere najpovoljnije varijantno rješenje, a da pri tome ono jamči kvalitetu koju mora ispuniti suvremena prometna infrastruktura.

Sam izbor najpovoljnijega varijantnog rješenja trase provodi se iterativnim optimizacijskim procesom. Taj proces je posljedica činjenice da željezničke pruge pripadaju skupu diskretnih sustava [33], a to znači da se za njihov opis ne može formulirati sveobuhvatni matematički model, nego se pomoću iterativnog optimizacijskog procesa mora generirati više varijantnih rješenja trase željezničke pruge. Aktivnosti u okviru iterativnog optimizacijskog procesa su sljedeće: generiranje varijantnih rješenja  $V_j$ , uspostavljanje liste relevantnih kriterija  $K_i$  i kriterijskih funkcija za vrednovanje, pojedinačno vrednovanje svake varijante prema svakom kriteriju, odnosno za svaku varijantu utvrđuje se vrijednost kriterijske funkcije  $f_{ij}$ . U slučaju da se neki kriterij ne može jasno kvantificirati i prikazati jednom numeričkom vrijednošću, tada se kriterijska funkcija iskazuje trouglastim neizrazitim brojem  $f_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, r_{ij})$ . Zadnja aktivnost u tom procesu je rangiranje varijantnih rješenja. Rezultat rangiranja je rang-lista koja daje poredak vrednovanih varijantnih rješenja (ako postoji više scenarija vrijednosti težinskih koeficijenata, tada se prilikom rangiranja za svaki scenarij dobiva odgovarajuća rang-lista). Na osnovi rang-liste obavlja se izbor i donosi konačna odluka o najpovoljnijoj varijanti trase željezničke pruge. Najpovoljnija varijanta može biti konačna ili pak suženi skup rješenja.

Predloženi neizraziti pristup višekriterijskog odlučivanja u ovom radu provjeren je na projektu nove trase dvokolosiječne pruge na dionici između postaja Inđija i Novi Sad [42]. Ta dionica je dio Koridora Xb koji prolazi kroz Republiku Srbiju i u sklopu je Osnovne TEN-T mreže na prostoru zapadnog Balkana.

### 5.1. Generiranje varijantnih rješenja trase

Varijantna rješenja nove trase željezničke pruge između postaja Inđija i Novi Sad su generirana:

- variranjem osnovnih tehničkih (konstrukcijskih i uporabnih) elemenata trase,
- uklapanjem i prilagođavanjem trase s: postojećim i planiranim prostornim strukturama, rasporedom kulturno-povijesnog naslijeđa i zaštićenih područja,
- na osnovi terenskih, geoloških i hidroloških uvjeta neposrednog okruženja.

S obzirom na raspored prostornih struktura (postojeća naselja, Nacionalni park Fruška gora, Sremski Karlovci kao spomenik kulture, zaštićeni ritovi i rijeka Dunav) i veoma složene geološke pokazatelje terena ("čortanovačko klizište") na dionici između postaja Inđija i Novi Sad, pokazale su se dvije osnovne mogućnosti vođenja nove trase.

**Prva**, koja maksimalno uzima u obzir postojeći koridor pruge Inđija - Novi Sad, a napušta ga u zoni "čortanovačkog klizišta" između Beške i Sremskih Karlovaca. U tom koridoru razrađeno je više varijantnih rješenja.

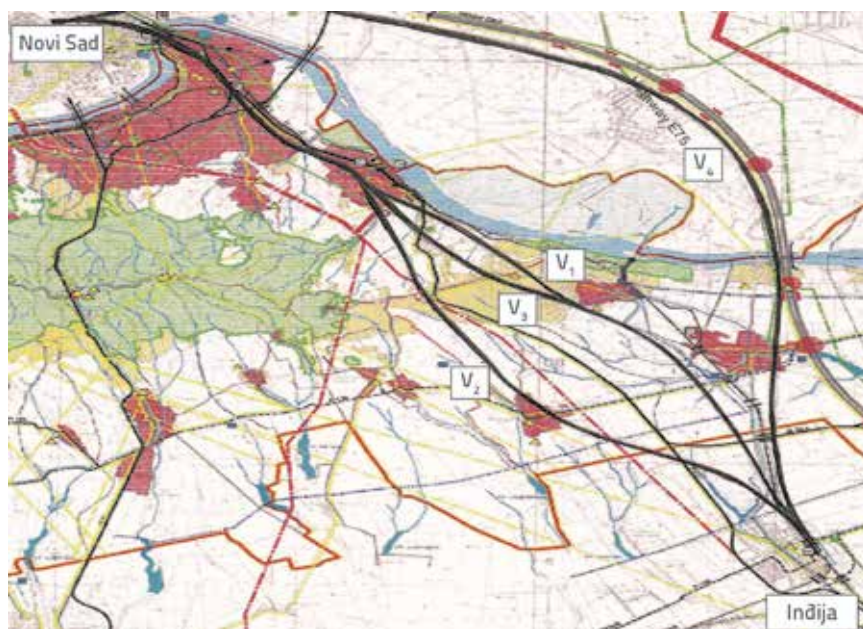
**Druga**, koja ispred postaja Beška napušta koridor postojeće pruge i prelazi Dunav i paralelno s autocestom E75 Beograd- Novi Sad prilazi Novom Sadu s istočne strane, a u Novi Sad ulazi preko kanala Dunav-Tisa-Dunav.

Iz skupa generiranih rješenja, za daljnji iterativni optimizacijski postupak izabrana su četiri dopustiva varijantna rješenja trase željezničke pruge  $V_j = (j = 1, \dots, 4)$  (slika 2.), od kojih su tri rješenja pored desne i jedno pored lijeve obale Dunava. Osnovne karakteristike tih rješenja su:

- **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 ove trase iznosi 32,455 km.
- **varijanta  $V_2$  - Maradik**: iza postaje Inđija odmah napušta koridor postojeće pruge i skreće prema Maradiku, a zatim se spušta prema Petrovaradinu pri čemu s tri tunela prolazi kroz obronke Fruške gore. Ulazak u stanicu Novi Sad je preko novog mosta na Dunavu, isti kao i kod varijante Čortanovci. Dužina ove trase iznosi 32,010 km.
- **varijanta  $V_3$  - kombinirana**: od postaje Inđija do postaje Čortanovci se poklapa s varijantom Čortanovci, a zatim skreće lijevo prema obroncima Fruške gore i kod Sremskih Karlovaca se uklapa u trasu varijante Maradik. Dužina ove trase iznosi 32,605 km.

Tablica 2. Prikaz karakteristika varijantnih rješenja

Karakteristike trase	Varijantna rješenja			
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
Dužina trase [km]	32,455	32,010	32,605	39,800
Broj stanica	6	4	6	5
Dužina otvorene pruge [km]	24,920	23,580	23,165	34.640
Dužina staničnih kolosijeka [km]	6,850	3,950	6,550	6,600
Dužina tunela [km]	3,450	6,100	7,500	1,850
Dužina mostova [km]	4,195	2,330	1,805	3,310



Slika 2. Prikaz varijantnih rješenja trase željezničke pruge

- **varijanta  $V_4$  - Kovilj:** napušta koridor postojeće pruge ispred Bečke, zatim skreće desno, odakle se tunelom spušta i mostom prelazi Dunav da bi u nastavku pratila koridor autoceste Beograd-Subotica. Mostom preko kanala DTD ulazi u stanicu Novi Sad. Dužina ove trase iznosi 39,800 km.

Ostale karakteristike ovih rješenja dane su u tablici 2.

## 5.2. Vrednovanje i rangiranje varijantnih rješenja trase

Izabrana varijantna rješenja trase se u daljem iterativnom optimizacijskom postupku procjenjuju i vrednuju na osnovi: investicija za izgradnju trase, troškova upravljanja i održavanja trase, kapaciteta trase (propusne moći), utjecaja i posljedica na prostorni razvoj i životnu sredinu. Ova procjena i vrednovanje ostvaruju se preko usvojene liste kvantitativnoekonomskih, kvantitativnotehničkih i kvalitativnih kriterija  $K_i = (i = 1, \dots, 5)$  i odgovarajućih kriterijskih funkcija  $f_i = (i = 1, \dots, 5)$ . Ova lista se sastoji od sljedećih kriterija:

$K_1$  - **investicije za izgradnju trase** iskazuju se monetarnim jedinicama i obuhvaćaju investicije za izgradnju dionica otvorene pruge, postaja, postrojenja električne vuče i investicije za SS i TK uređaje.

$K_2$  - **troškovi upravljanja i održavanja trase** iskazuju se monetarnim jedinicama na godišnjoj razini i obuhvaćaju troškove za održavanje pruge, postaja, postrojenja električne vuče, SS i TK uređaja i troškove organizacije prometa i upravljanja.

$K_3$  - **kapacitet - propusna moć trase** predstavlja broj pari vlakova, odnosno broj vlakova koji se može propustiti za promatrani vremenski razmak.

$K_4$  - **posljedice trase na prostorni razvoj** ocjenjuju se bodovima i odnose se na pokazatelje očuvanja prostornih cjelina, zauzimanja površina poljoprivrednog i građevinskog zemljišta i očuvanja kulturno-povijesnog nasljeđa.

$K_5$  - **utjecaj trase na životnu sredinu** ocjenjuje se bodovima i odnosi se na pokazatelje utjecaja buke i vibracija, utjecaja na zemljište, vodne resurse, floru i faunu, klimu i mikroklimu.

Predloženi kriteriji su prikazani odgovarajućim kriterijskim funkcijama  $f_i$ , koje se izračunavaju primjenom metodologije koja je definirana u radu [6], a sam postupak procjene se ostvaruje na način pojedinačnog vrednovanja svake varijante prema svakom kriteriju,

odnosno za svaku varijantu utvrđuje se vrijednost kriterijske funkcije  $f_{ij}$ . Kako tijekom procjenjivanja vrijednosti kriterijskih funkcija za svako varijantno rješenje postoji neodređenost, odnosno funkcije se ne iskazuju jednom numeričkom vrijednošću, nego se pojavljuje triplet vrijednosti: najmanja, modalna-najperspektivnija i najveća moguća vrijednost, tada se ovaj problem prevladava primjenom trouglastih neizrazitih brojeva i kriterijske funkcije se prikazuju u sljedećem obliku  $f_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, r_{ij})$ . U ovom poretku kriterijskih funkcija, funkcije  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_4$  i  $f_5$  imaju minimizirajuću karakteristiku, a funkcija  $f_3$  ima maksimizirajuću karakteristiku. Rezultati procjene vrijednosti predloženih varijantnih rješenja postaju elementi početne matrice za odlučivanje  $F_{ij}$  i prikazani su u tablici 3.

Budući da su kriterijske funkcije različitih mjernih jedinica, izvedena je normalizacija polazne matrice za odlučivanje  $F_{ij}$  (korak 1 i korak 2 algoritma neizrazite VIKOR metode). Za realizaciju postupka rangiranja potrebno je svim kriterijima dodijeliti neizrazite težinske koeficijente  $\tilde{w}_i$  i odrediti neizrazite mjere odstupanja  $\tilde{S}_j$  i  $\tilde{R}_j$  varijanti od idealnih rješenja (korak 3). Za vrijednosti težinskih koeficijenata svih kriterija usvojene su

Tablica 3. Početna matrica za odlučivanje

Kriteriji i kriterijske funkcije			Varijantna rešenja				
			V1	V2	V3	V4	
K1 - investicije za izgradnju trase	$\tilde{f}_1$ (10 <sup>6</sup> €)	min	l	212,12	223,05	250,05	229,88
			m	212,12	223,05	250,05	229,88
			r	222,73	234,20	262,55	241,37
K2 - troškovi upravljanja i održavanja trase	$\tilde{f}_2$ (10 <sup>6</sup> €/god)	min	l	19,19	18,62	18,81	22,42
			m	20,20	19,60	19,80	23,60
			r	21,21	20,58	20,79	24,78
K3 - kapacitet-propusna moć trase	$\tilde{f}_3$ (pari vlakova)	max	l	106,00	107,00	106,00	103,00
			m	106,00	107,00	106,00	103,00
			r	106,00	107,00	106,00	103,00
K4 - posljedice trase na prostorni razvoj	$\tilde{f}_4$ (bodova)	min	l	33,25	34,20	28,50	41,80
			m	35,00	36,00	30,00	44,00
			r	36,75	37,80	31,50	46,20
K5 - utjecaj trase na životnu sredinu	$\tilde{f}_5$ (bodova)	min	l	17,10	11,40	10,45	7,60
			m	18,00	12,00	11,00	8,00
			r	18,90	12,60	11,55	8,40

nenormalizirane vrijednosti u obliku cijelih brojeva u rasponu od 1 do 3 i predloženo je pet mogućih scenarija vrijednosti. Nenormalizirane vrijednosti težinskih koeficijenata, za predložene moguće scenarije, prikazane su u tablici 4.

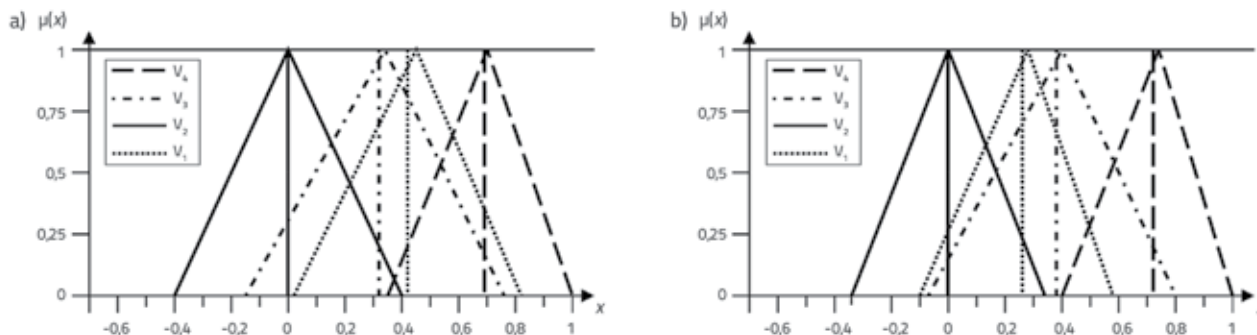
Tablica 4. Predložene vrijednosti težinskih koeficijenata

Težinski koeficijenti	Scenariji				
	SC I	SC II	SC III	SC IV	SC V
$\tilde{w}_1$	(1,1,1)	(3,3,3)	(3,3,3)	(2,2,2)	(2,2,2)
$\tilde{w}_2$	(1,1,1)	(3,3,3)	(3,3,3)	(2,2,2)	(2,2,2)
$\tilde{w}_3$	(1,1,1)	(3,3,3)	(2,2,2)	(3,3,3)	(2,2,2)
$\tilde{w}_4$	(1,1,1)	(2,2,2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(3,3,3)
$\tilde{w}_5$	(1,1,1)	(2,2,2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(3,3,3)

Prvi scenarij (SC I) predviđa podjednaku važnost svih kriterija, tako da kriteriji imaju iste težinske koeficijente. U drugom scenariju (SC II) prednost se daje podjednako ekonomskom

i prometnom aspektu tako da ovi kriteriji imaju nešto veće težinske koeficijente. U trećem scenariju (SC III) prednost se daje prije svega ekonomskim kriterijima, u četvrtom je scenariju (SC IV) prednost dana prometnom aspektu. Konačno, u petom scenariju (SC V) problem rangiranja razmotren je s prostorno-ekološkog aspekta dajući prednost prije svega utjecajima na prostorni razvoj i životnu sredinu. Kao u radu [6], razlog definiranja tih scenarija je provjera stabilnosti varijanti na rang-listama.

Na osnovi usvojene težine strategije odlučivanja "većinom kriterija" od  $\theta = 0,5$  utvrđene su i neizravne mjere odstupanja varijanti od idealnih rješenja. Njihove vrijednosti su prikazane u tablici 5., a na slici 3. prikazane su vrijednosti  $\tilde{Q}$ , za prva dva scenarija težinskih koeficijenata (korak 4). Nakon defazifikacije vrijednosti  $\tilde{Q}S$ ,  $\tilde{Q}R$  i  $\tilde{Q}$  (korak 5) slijedi formiranje finalne matrice za odlučivanje i rang-listi za mjere odstupanja  $QS$ ,  $QR$  i  $Q$ , što je prikazano u tablicama 6. i 7. Na slici 4. prikazana je strateška stabilnost mjera odstupanja  $QS$ ,  $QR$  i  $Q$  na primjeru prvog i drugog scenarija. Rangiranje je ostvareno po opadajućim vrijednostima za svaku od mjere odstupanja (korak 6).



Slika 3. Neizravne mjere odstupanja  $\tilde{Q}$ , varijanti od idealnih rješenja i njihove defazificirane vrijednosti: a) prvi scenarij (SC I); b) drugi scenarij (SC II)



Tablica 5. Mjere odstupanja  $\overline{QS}$ ,  $\overline{QR}$  i  $\overline{Q}$ 

Scenarij		Varijantna rješenja											
		$V_1$			$V_2$			$V_3$			$V_4$		
		<i>l</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>r</i>
SC I	$\overline{QS}$	-0,294	0,171	0,632	-0,456	0,000	0,456	-0,341	0,110	0,568	0,064	0,531	1,000
	$\overline{QR}$	0,333	0,723	1,000	-0,354	0,000	0,354	0,022	0,542	1,000	0,646	0,880	1,000
	$\overline{Q}$	0,020	0,447	0,816	-0,405	0,000	0,405	-0,159	0,326	0,784	0,355	0,705	1,000
SC II	$\overline{QS}$	-0,303	0,134	0,568	-0,431	0,000	0,431	-0,267	0,160	0,596	0,114	0,556	1,000
	$\overline{QR}$	0,092	0,430	0,595	-0,317	0,000	0,317	0,126	0,627	1,000	0,683	0,928	1,000
	$\overline{Q}$	-0,106	0,282	0,582	-0,374	0,000	0,374	-0,070	0,394	0,798	0,399	0,742	1,000
SC III	$\overline{QS}$	-0,381	0,074	0,525	-0,451	0,000	0,451	-0,235	0,213	0,672	0,072	0,535	1,000
	$\overline{QR}$	-0,179	0,085	0,364	-0,364	0,000	0,383	0,133	0,587	1,000	0,270	0,493	1,000
	$\overline{Q}$	-0,280	0,080	0,445	-0,407	0,000	0,417	-0,051	0,400	0,836	0,171	0,514	1,000
SC IV	$\overline{QS}$	-0,233	0,133	0,495	-0,361	0,000	0,361	-0,163	0,196	0,562	0,257	0,628	1,000
	$\overline{QR}$	-0,038	0,165	0,268	-0,223	0,000	0,223	0,076	0,391	0,634	0,776	0,938	1,000
	$\overline{Q}$	-0,136	0,149	0,382	-0,292	0,000	0,292	-0,043	0,294	0,598	0,517	0,783	1,000
SC V	$\overline{QS}$	-0,282	0,218	0,714	-0,489	0,000	0,489	-0,435	0,046	0,534	0,000	0,499	1,000
	$\overline{QR}$	0,332	0,722	1,000	-0,353	0,000	0,353	-0,223	0,200	0,546	0,192	0,594	1,000
	$\overline{Q}$	0,333	0,723	1,000	-0,354	0,000	0,354	-0,224	0,201	0,546	0,192	0,595	1,000

Tablica 6. Matrice za odlučivanje na osnovu mjera odstupanja i nakon defazifikacije

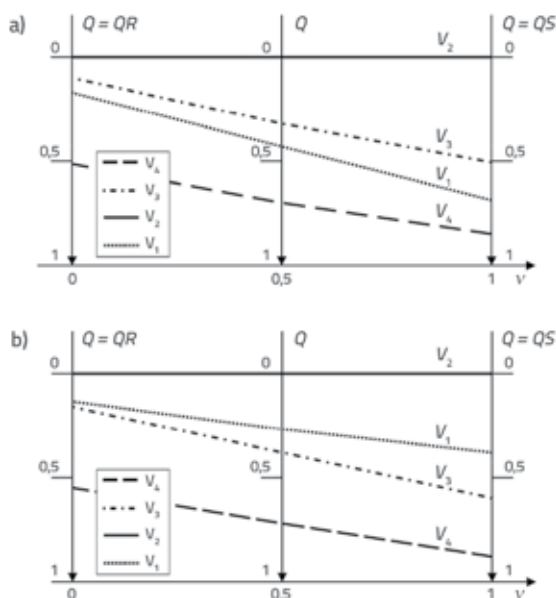
Scenarij		Varijantna rješenja							
		$V_1$		$V_2$		$V_3$		$V_4$	
		<i>def. vrijednost</i>	<i>rang</i>	<i>def. vrijednost</i>	<i>rang</i>	<i>def. vrijednost</i>	<i>rang</i>	<i>def. vrijednost</i>	<i>rang</i>
SC I	QS	0,170	3	0,000	1	0,112	2	0,532	4
	QR	0,695	3	0,000	1	0,527	2	0,851	4
	Q	0,432	3	0,000	1	0,319	2	0,691	4
SC II	QS	0,134	2	0,000	1	0,162	3	0,557	4
	QR	0,387	2	0,000	1	0,595	3	0,885	4
	Q	0,260	2	0,000	1	0,379	3	0,721	4
SC III	QS	0,073	2	0,000	1	0,216	3	0,535	4
	QR	0,089	2	0,000	1	0,577	4	0,564	3
	Q	0,081	2	0,000	1	0,396	3	0,550	4
SC IV	QS	0,132	2	0,000	1	0,198	3	0,628	4
	QR	0,140	2	0,000	1	0,373	3	0,913	4
	Q	0,136	2	0,000	1	0,286	3	0,771	4
SC V	QS	0,217	3	0,000	1	0,047	2	0,499	4
	QR	0,695	4	0,000	1	0,181	2	0,596	3
	Q	0,456	3	0,000	1	0,114	2	0,548	4

Tablica 7. Rang liste varijanti trase za predložena scenarija i  $\vartheta = 0,5$

Scenarij	Rang			
	1	2	3	4
SC I	$V_2(0,000)$	$V_3(0,319)$	$V_1(0,432)$	$V_4(0,691)$
SC II	$V_2(0,000)$	$V_1(0,260)$	$V_3(0,379)$	$V_4(0,721)$
SC III	$V_2(0,000)$	$V_1(0,081)$	$V_3(0,396)$	$V_4(0,550)$
SC IV	$V_2(0,000)$	$V_1(0,136)$	$V_3(0,286)$	$V_4(0,771)$
SC V	$V_2(0,000)$	$V_3(0,114)$	$V_1(0,456)$	$V_4(0,548)$

### 5.3. Analiza rezultata

Zadnji korak u algoritmu neizrazite VIKOR metode (korak 7) prijedlog je kompromisnog rješenja i donošenje konačne odluke o najpovoljnijem varijantnom rješenju. Rezultati provedenog višekriterijskog rangiranja neizrazitom VIKOR metodom (tablica 7.) pokazuju da je varijanta  $V_2$  uvijek prva po rangu za svaki scenarij vrijednosti težinskih koeficijenata. U slučaju kada se prednost daje ekonomskim, prometnim ili ekološkim kriterijima, tada postoji skup kompromisnih rješenja, a to su varijanta  $V_2$  i varijanta  $V_1$ , odnosno varijanta  $V_2$  i varijanta  $V_3$ . Ovako dobiveni rezultati ponudit će se donositeljima odluke u postupku odlučivanja za rješenje izbora trase željezničke pruge na dionici između postaje Inđija i stanice Novi Sad. Koje će od tih rješenja izabrati donositelji odluke, zavisi od scenarija koji će prihvatiti. Za scenarije SC I i SC II varijanta se Maradik ( $V_2$ ) predlaže kao kompromisno rješenje jer su ispunjeni uvjeti U1 i U2, odnosno uvjeti "dovoljne prednosti" i "dovoljne stabilnosti" (slika 4.).



Slika 4. Stabilnost QS, QR i Q na osnovu težinskog faktora strategije odlučivanja  $\vartheta$ : a) prvi scenarij (SC I); b) drugi scenarij (SC II)

Za slučaj scenarija SC III i SC IV predlaže se skup kompromisnih rješenja varijante Maradik ( $V_2$ ) i Čortanovci ( $V_1$ ), a za slučaj

scenarija SC V predlaže se skup kompromisnih rješenja varijante Maradik ( $V_2$ ) i kombinirana ( $V_3$ ). U slučajevima ovih scenarija (SC III, SC IV i SC V) ispunjen je uvjet U2, a nije ispunjen uvjet U1. Zbog toga je potrebno dodatno analizirati varijantna rješenja iz skupa kompromisnih rješenja i ponoviti rangiranje s ciljem dobivanja konačnog kompromisnog rješenja.

### 6. Zaključak

U radu je prikazan pristup neizrazitog višekriterijskog odlučivanja u procesu planiranja i projektiranja željezničke infrastrukture. Neovisno o tome grade li se novi ili rekonstruiraju postojeći objekti, postupak višekriterijskog odlučivanja u procesu planiranja i projektiranja sastoji se od definiranja problema i generiranja varijantnih rješenja nakon čega se provodi njihovo vrednovanje i izbor najpovoljnijega rješenja. Prilikom vrednovanja varijantnih rješenja potrebno je razmotriti investicijske troškove, uporabne značajke i funkcionalnost, kao i širi društveno - ekonomski kontekst uzimajući u obzir i vanjske učinke. U takvim okolnostima pokazale su se metode višekriterijskog odlučivanja kao pogodno tehnike kojima se pronalaze najbolje, odnosno najmanje loše varijante u odnosu na definirane kriterije i njihove težine. Metode koje su u postojećoj literaturi primijenjene prilikom vrednovanja i rangiranja projekata prometnica (bilo željezničke ili cestovne infrastrukture) zasnivaju se na jasnoj pretpostavci, odnosno na već formiranom skupu dopustivih varijantnih rješenja i precizno definiranim kriterijima i kriterijskim funkcijama. S druge strane, problem odlučivanja pri vrednovanju varijantnih rješenja infrastrukturnih projekata najčešće karakteriziraju kriteriji koji se ne mogu jasno (precizno) kvantificirati kriterijskom funkcijom i prikazati jednom točkastom numeričkom vrijednošću za svako generirano varijantno rješenje.

S tim u vezi, novopredloženi pristup se zasniva na teoriji neizrazitih skupova i omogućava cjelovito i sustavno rješavanje problema postojanja faktora neizvjesnosti i neodređenosti prilikom procjene vrijednosti kriterijskih funkcija. Predloženi pristup višekriterijskog odlučivanja je predstavljen u okviru metodologije za vrednovanje i izbor najpovoljnije trase željezničke pruge. Varijante trase se u okviru metode generiraju preko različitih vrijednosti konstrukcijskih i uporabnih parametara sustava, a procjena i vrednovanje ostvaruju se preko više kriterijskih funkcija (investicije za izgradnju trase, troškovi upravljanja i održavanja trase, kapacitet trase, posljedice trase na prostorni razvoj i utjecaj trase na životnu sredinu) uz primjenu neizrazitih brojeva, što je znatno povoljnije i preciznije u odnosu na točkaste vrijednosti. Za rangiranje generiranih varijantnih rješenja primijenjen je pristup kompromisnog rangiranja u neizrazitom okruženju, odnosno neizrazita VIKOR metoda. Više scenarija vrijednosti težinskih koeficijenata omogućilo je provjeru stabilnosti varijanti na ranglistama. Krajnji rezultat neizrazitog višekriterijskog odlučivanja je prijedlog trase, a ona treba predstavljati najbolje rješenje iz skupa definiranih dopustivih rješenja u skladu s usvojenim kriterijima i realnim ograničenjima.

Ako se usporede rezultati dobiveni u ovom radu s rezultatima koji su dobiveni primjenom klasičnog višekriterijskog postupka u radu [6], može se uočiti da se ne mijenja poredak predloženih generiranih varijantnih rješenja na rang-listama ni u novim neizrazitim uvjetima. Dobiveni rezultati su verificirali i pokazali ispravnost predloženog pristupa, kao i njegovu praktičnu primjenu u rješavanju problema izbora trasa. Primijenjena metodologija i neizrazit pristup višekriterijskog odlučivanja predstavljaju podršku donositeljima konačne odluke u procesu odlučivanja i mogu se uspješno koristiti i kod drugih prometnih

infrastrukturnih objekata pri rješavanju problema rangiranja i izbora najpovoljnijega varijantnog rješenja.

## Zahvala

Ovaj rad je ostvaren uz podršku Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta, evidencijski broj 36012: "Istraživanje tehničko-tehnološke, kadrovske i organizacione osposobljenosti železnica Srbije sa aspekta sadašnjih i budućih zahteva Evropske unije".

## LITERATURA

- [1] 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, pp. 1-24.
- [2] Barić, D., Pilko, H., Strujić, J.: An Analytic Hierarchy Process model to evaluate road section design, *Transport*, 31 (2016) 3, pp. 312-321.
- [3] Sarrazin, R., De Smet, Y.: Applying multicriteria decision analysis to design safe road projects, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 15 (2015) 4, pp. 613-634.
- [4] Krpan, L., Vilke, S., Milković, M.: A model of the selection of an optimal railroad route by applying the multiple-criteria analysis, *Tehnički vjesnik*, 24 (2017) 4, pp. 1155-1164.
- [5] Anton, J.M., Grau, J.B.: Madrid-Valencia high-speed rail line: a route selection, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 157 (2004) 3, pp. 153-161.
- [6] Kosijer, M., Ivic, M., Markovic, M., Belosevic, I.: Multicriteria decision-making in railway route planning and design, *Gradevinar*, 64 (2012) 3, pp. 195-205.
- [7] Kelly, C., Laird, J., Costantini, S., Richards, P., Carbajo, J., Nellthorp, J.: Ex post appraisal: What lessons can be learnt from EU cohesion funded transport projects?, *Transport Policy*, 37 (2015), pp. 83-91.
- [8] Zadeh, L.A.: Fuzzy sets, *Information and Control*, 8 (1965) 3, pp. 338-353.
- [9] Colorni, A., Laniado, E., Muratori, S.: Decision support systems for environmental impact assessment of transport infrastructures, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 4 (1999) 1, pp. 1-11.
- [10] Tudela, A., Akiki, N., Cisternas, R.: Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40 (2006) 5, pp. 414-423.
- [11] Elhorst, J. P., Oosterhaven, J.: Integral cost-benefit analysis of Maglev projects under market imperfections, *Journal of Transport and Land Use*, 1 (2008) 1, pp. 65-87.
- [12] Tsamboulas, D.A.: A tool for prioritizing multinational transport infrastructure investments, *Transport Policy*, 14 (2007) 1, pp. 11-26.
- [13] Teng, J.Y., Huang, W. C., Lin, M.C.: Systematic budget allocation for transportation construction projects: a case in Taiwan, *Transportation*, 37 (2010) 2, pp. 331-361.
- [14] De Neufville, R., Keeney, R.L.: Multiattribute preference analysis for transportation systems evaluation, *Transportation Research*, 7 (1973) 1, pp. 63-76.
- [15] Saaty, T.L.: Scenarios and priorities in transport planning: Application to the Sudan, *Transportation Research*, 11 (1977) 5, pp. 343-350.
- [16] Roy, B., Hugonnard, J.C.: Ranking of suburban line extension projects on the Paris Metro System by a multicriteria method, *Transportation Research Part A: General*, 16 (1982) 4, pp. 301-312.
- [17] Giuliano, G.: A multicriteria method for transportation investment planning, *Transportation Research Part A: General*, 19 (1985) 1, pp. 29-41.
- [18] Roy, B., Présent, M., Silhol, D.: A programming method for determining which Paris metro stations should be renovated, *European Journal of Operational Research*, 24 (1986) 2, pp. 318-334.
- [19] Cook, W.D., Golan, I., Kazakov, A., Kress, M.: A case study of a non-compensatory approach to ranking transportation projects, *Journal of the Operational Research Society*, 39 (1988) 10, pp. 901-910.
- [20] Kalamaras, G.S., Brino, L., Carrieri, G., Pline, C., Grasso, P.: Application of multicriteria analysis to select the best highway alignment, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (2000) 4, pp. 415-420.
- [21] Banai, R.: Evaluation of land use-transportation systems with the Analytic Network Process, *Journal of Transport and Land Use*, 3 (2010) 1, pp. 85-112.
- [22] Hamurcu, M., Eren, T.: A multicriteria decision-making for monorail route selection in Ankara, *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 4 (2016) 5, pp. 121-125.
- [23] Barić, D., Pižeta, F.: An AHP model for level crossing design, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 8 (2018) 1, pp. 65-76.
- [24] Saat, M.R., Aguilar Serrano, J.: Multicriteria high-speed rail route selection: application to Malaysia's high-speed rail corridor prioritization, *Transportation Planning and Technology*, 38 (2015) 2, pp. 200-213.
- [25] Anton, 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, pp. 99-122.

- [26] Belošević, I., Kosijer, M., Ivić, M., Pavlović, N.: Group decision making process for early stage evaluations of infrastructure projects using extended VIKOR method under fuzzy environment, *European Transport Research Review*, 10 (2018) 2, pp. 43.
- [27] Keshkamat, S.S., Looijen, J.M., Zuidgeest, M.: The formulation and evaluation of transport route planning alternatives: a spatial decision support system for the Via Baltica project, Poland, *Journal of transport geography*, 17 (2009) 1, pp. 54-64.
- [28] Kim, H.Y., Wunneburger, D., Neuman, M., An, S.Y.: Optimizing high-speed rail routes using a Spatial Decision Support System (SDSS): the Texas Urban Triangle (TUT) case, *Journal of transport geography*, 34 (2014), pp. 194-201.
- [29] Karleuša, B., Dragičević, N., Deluka-Tibljaš, A.: Review of multicriteria-analysis methods application in decision making about transport infrastructure, *Građevinar*, 65 (2013) 7, pp. 619-631.
- [30] Kabir, G., Sadiq, R., Tesfamariam, S.: A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management, *Structure and Infrastructure Engineering*, 10 (2014) 9, pp. 1176-1210.
- [31] Zavadskas, E.K., Antuchevičienė, J., Kapliński, O.: Multi-criteria decision making in civil engineering: Part I: a state of the art, *Engineering Structures and Technologies*, 7 (2015) 3, pp. 103-113.
- [32] Zavadskas, E.K., Antuchevičienė, J., Kapliński, O.: Multi-criteria decision making in civil engineering. Part II: Applications, *Engineering Structures and Technologies*, 7 (2015) 4, pp. 151-167.
- [33] Opricovic, S.: Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu, Građevinski fakultet, Beograd, 1988.
- [34] Opricovic, S., Tzeng, G. H.: Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, *European Journal of Operational Research*, 156 (2004) 2, pp. 445-455.
- [35] Opricovic, S., Tzeng, G.H.: Extended VIKOR method in comparison with outranking methods, *European Journal of Operational Research*, 178 (2007) 2, pp. 514-529.
- [36] Zeleny, M.: Multiple criteria decision making, Mc Graw-Hill, New York, 1982.
- [37] Klir, G.J., Yuan, B.: Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications, Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- [38] Wang, L.X.: A course in fuzzy systems and control, Prentice-Hall, New Jersey, 1997.
- [39] Zimmermann, H.J.: Fuzzy Set Theory - and its applications, Springer Science & Business Media, New York, 2011.
- [40] Opricovic, S.: Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning, *Expert Systems with Applications*, 38 (2011) 10, pp. 12983-12990.
- [41] Opricovic, M.: VIKOR method with application to borrowing terms selection. In: *Multiple Criteria Decision Making in Finance, Insurance and Investment*, Springer International Publishing, Cham, pp. 205-227, 2015.
- [42] Grupa autora: Studija podobnosti modernizacije železničke pruge Subotica-Beograd-Niš-Dimitrovgrad: Bankarski dosije, Saobraćajni institut CIP & Sofrerail Pariz, Beograd, 1991.