

MILIVOJE ILIĆ\*, NORBERT PAVLOVIĆ\*\*, IVAN BELOŠEVIĆ\*\*\*

# FUZZY-FMEA PRISTUP ZA ANALIZU RIZIKA ELEMENTATA SKRETNICE

## FUZZY-FMEA APPROACH FOR RISK ANALYSIS OF SWITCH ELEMENTS

UDK: 656.2+625.1/.5:519.8

### REZIME:

Skretnice predstavljaju ključni elementi železničke infrastrukture. Njeni pokretni delovi menjaju položaj u zavisnosti od toga da li predstojeća vožnja treba da se izvrši u pravac ili u skretanje. Sa većim brojem vozova njihovo opterećenje raste, pojačava se trošenje delova, i javlja se potreba frekventnijeg održavanja. U praksi se često dešavaju iskliznuća na skretničkim područjima, zbog čega sa aspekta bezbednosti zauzimaju značajno mesto. U ovom radu posmatrani su elementi skretnice kao tehnički sistemi koji mogu da otkazu i dovedu do incidentne situacije. Primenjen je pristup analize rizika tehničkih sistema za utvrđivanje scenarija otkaza skretnice. Posmatrani su osnovni elementi skretnice koje su eksperti ocenili lingvističkim fazi ocenama u zavisnosti od faktora rizika. U tu svrhu korišćena je FMEA metoda koja definiše faktore rizika i to: ozbiljnost pojave defekta, verovatnoću pojave defekta i način detektovanja defekta. Ovi faktori su posmatrani kao kriterijumi u nastavku u procesu višekriterijumskog odlučivanja primenom TOPSIS metode. Cilj rada je da se na osnovu TOPSIS metode dobije koji su to kritični elementi i da se izvrši njihovo rangiranje. Rezultati rada pokazuju da se pristup analize rizika može uspešno primeniti kod detekcije i rangiranja elemenata skretnice, kao i za traženja novih rešenja u strategiji njihovog održavanja i konstrukcije.

**Ključne reči:** skretnica, višekriterijumsko odlučivanje, analiza rizika, FMEA, TOPSIS

### SUMMARY:

Switches are key elements of railway infrastructure. Its moving parts change position depending on whether the upcoming running should be done in straight or in diverging. With a larger number of trains, their load increases, which affects the increased wear of parts, as well as the need for more frequent maintenance. In practice, derailments often occur at switch areas, therefore it is so important from the safety aspect. In this paper, the elements of the switch were considered as technical systems that can fail and lead to an incident situation. The approach of risk analysis of technical systems was applied to determine the scenario of switch failure. First, the switch was decomposed into basic elements that were evaluated by experts with linguistic fuzzy estimates depending on the risk factors. For this purpose, the FMEA method was used, which defines the risk factors: the severity of the defect occurrence, the probability of the defect occurrence, and the ease of failure detection. These factors are considered as criteria in the next step of the process of multi-criteria decision-making using the TOPSIS method. The aim of the work is to find out which are the critical elements based on the TOPSIS method and to rank them. The results of the work show that the risk analysis approach can be successfully applied in the detection and ranking of switch elements, as well as in the search for new design solutions in the strategy of their maintenance and construction.

**Key words:** switch, multicriteria decision making, risk analysis, FMEA, TOPSIS

\* Milivoje Ilić, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Srbija, Beograd, Vojvode Stepe 305, m.ilic@sf.bg.ac.rs

\*\* Norbert Pavlović, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Srbija, Beograd, Vojvode Stepe 305, norbert@sf.bg.ac.rs

\*\*\* Ivan Belošević, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Srbija, Beograd, Vojvode Stepe 305, i.beloševic@sf.bg.ac.rs

## 1. UVOD

Železnički sistem je jedan od najvažnijih transportnih sistema u svetu. Još od nastanka prve parne lokomotive, kroz dizel vuču i kasniju elektrifikaciju, ljudi su videli potencijal železnice u masovnom transportu ljudi i robe. Pored karakteristika kao što su: veliki transportni kapacitet, velike tehničke brzine, visok nivo bezbednosti, komfor i udobnost putnika, niska cena prevoza, povoljan uticaj na životnu sredinu; potpuno je jasno zašto je železnica jedan od najdominantnijih oblika transporta u svetu.

Pored mnogih elemenata koji čine železničku infrastrukturu, posebno su značajne skretnice. Skretnica je specijalizovano postrojenje veoma složene konstrukcije koje omogućava prelaz pojedinačnih železničkih vozila ili celih vozova sa jednog koloseka na drugi bez prekida kretanja (Ivić, 2005). Skretnica uglavnom ima dva koloseka, osnovni i odvojni kolosek. Osnovni kolosek je kolosek od koga se odvaja jedan ili više koloseka koje vode u skretanje. Izdvajanje odvojnih koloseka vrši se pod uglom koji se naziva skretnički ugao. Osnovni kriterijum za klasifikaciju skretnica je njihova konstrukcija. Shodno tome, skretnice su podeljene u četiri osnovne grupe: jednostruke skretnice, dvostruke skretnice, ukrasne skretnice i kombinovane skretnice. Jednostruke skretnice su one kod kojih se izdvaja samo jedan kolosek, dok su dvostruke skretnice one gde se dva odvojna koloseka odvajaju od osnovnog koloseka. Ukrasne skretnice su one koje uspostavljaju vezu između dva koloseka koji se ukrštaju (seku pod skretničkim uglom). Kombinovane skretnice su one koje omogućavaju prelazak vozila sa dva koloseka različitih širina na jedan kolosek kombinovane širine.

Iskliznuće vozova iz šina predstavlja jedan od najčešćih tipova železničkih nesreća i nezgoda. Pored izazivanja značajne materijalne štete i čestog ometanja saobraćaja, posledice iskliznuća mogu biti i povrede ili smrt ljudi u slučaju iskliznuća putničkog voza ili ugrožavanje životne sredine (npr. u slučaju izlivanja opasnih materija) izazvane iskliznućem. S obzirom na to da do iskliznuća može doći i na otvorenoj pruzi i u stanicama, posebno u zonama skretnica; potrebno je eliminisati ili smanjiti faktore koji dovode do iskliznuća iz šina i ugrožavanja bezbednosti saobraćaja. Neki od radova iz ove oblasti su radovi autora (Dindar i Kaevunruen, 2017; Dindar et al, 2017) koji su se bavili faktorima koji dovode do iskliznuća iz šina, kao i odnosima između težine posledice i učestalosti iskliznuća iz šina. U prvom radu autori su razmatrali koji faktori i pod kojim

uslovima dovode do iskliznuća iz šina. Studija je pokazala da je nedovoljno održavanje skretnica najznačajniji faktor koji dovodi do iskliznuća iz šina. U drugom radu autori koriste FTA (analaza stabla otkaza) pomoću kojih mogu izračunati verovatnoće uticaja poddogađaja na učešće glavnog događaja, odnosno iskliznuća iz šina.

Brojni su radovi iz različitih naučnih oblasti koji sadrže neki oblik FMEA metode. Grupa autora na čelu sa (Oiang et al, 2022) razmatrala je model višestrukih perspektiva faktora analize rizika u FMEA metodi. Oni su predložili novu metodu klasifikacije kombinovanjem faktora rizika u parovima (S&O (ozbiljnost i pojava), S&D (ozbiljnost i detekcija), O&D (pojava i detekcija)). Autori su kombinovali FMEA i metod analize funkcionalne rezonance (FRAM) na primeru ledolomca na nuklearni pogon (Fu et al, 2022). U radu (Ebrahimi et al, 2022) Delphi-FMEA model je primenjen za određivanje prioriteta rizika u saobraćajnim nesrećama.

## 2. METODOLOGIJA KORIŠĆENA U RADU

U ovom poglavlju biće obrađeni osnovni koncepti metoda koje su korišćene u ovom radu. U pitanju su FMEA metoda, fuzzy pristup i fuzzy skupovi, kao i metoda višekriterijumskog odlučivanja TOPSIS.

### 2.1. FMEA

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) pripada grupi inženjerskih metoda i tehnika za poboljšanje kvaliteta. FMEA je metoda koja se koristi za procenu načina i efekata potencijalnih kvarova podsistema, sklopova, komponenti ili funkcija u sistemu. FMEA je induktivna, timska metoda koja zahteva vreme i dobro poznavanje sistema koji se analizira. Cilj metode je da se identifikuju smetnje i kvarovi koji mogu negativno uticati na pouzdanost celog sistema. FMEA se najčešće koristi u početnim fazama razvoja kako bi se osiguralo da se svi potencijalni kvarovi otkriju i eliminišu na vreme.

FMEA je veoma važna tehnika koja se koristi za identifikaciju i eliminisanje poznatih i potencijalnih grešaka sistema/podsistema. Cilj ove metode je povećanje pouzdanosti i sigurnosti sistema i veoma je važan u smislu analize rizika. Osnovni termini koji se koriste u FMEA su:

Kvar - odstupanje od planirane funkcije ili ponašanja; nesposobnost sistema, podsistema ili komponente da izvrši traženu funkciju.

Režim kvara - način na koji se element pokvari; oblik ili stanje elementa u kome se element nalazi nakon otkaza.

Uzrok kvara - proces ili mehanizam odgovoran za nastanak kvara. Procesi koji mogu izazvati kvar komponenti su npr. fizički kvar, defekt modela, proizvodni nedostatak, uticaj na životnu sredinu itd.

Efekat kvara - posledica kvara na funkcionisanje ili status elementa i sistema.

Osnovni koncept FMEA metode podrazumeva dekompoziciju sistema na njegove sastavne elemente, do nivoa koji je ocenjen kao značajan za analizu. Prvi korak je identifikovanje mogućih otkaza sistema, nakon čega se vrši analiza kritičnog otkaza, uzimajući u obzir faktore rizika: pojavu otkaza (O-Occurrence), ozbiljnost otkaza (S-Severity) i detekciju otkaza (D-Detection). Prioritetni rizici se određuju preko broja prioriteta rizika (RPN-Risk Priority Number), koji je predstavlja proizvod faktora rizika O, S i D. To je:

$$RPN = O * S * D \tag{1}$$

gde je O verovatnoća kvara (otakza), S je ozbiljnost kvara (otkaza), a D je verovatnoća da se kvar (otkaz) otkrije. Ova tri faktora rizika mogu se vrednovati i ocenjivati na osnovu skala. Skale mogu biti univerzalne (npr. od 1 do 10) ili se mogu formulirati za specifični sistem koji se analizira. Na osnovu RPN-a, rangiranjem se jasno dobijaju kritični elementi, koji se mogu sortirati prema najvećem ili najmanjem broju, odnosno najvećem ili najmanjem riziku od otkaza.

## 2.2. Fuzzy pristup i lingvističke promenljive

Teoriju fuzzy skupova razvio je (Zadeh, 1965) kao konceptualni okvir za tretiranje neizvesnih i nepreciznih situacija koje postoje u stvarnom životu. Uključujući teoriju fuzzy skupova u metodologiju višekriterijumskog odlučivanja, (Bellman i Zadeh, 1970) uvode matematički precizan način tretiranja nejasnoće i subjektivnosti u dodeljivanju težine kriterijuma i ocene učinka svake alternative u pogledu kriterijuma evaluacije. Do sada su različite metode višekriterijumskog odlučivanja proširene u fuzzy okruženju i primenjene u različitim oblastima inženjeringa ili menadžmenta (Mardani et al, 2015, Shafabakhsh et al. 2014). U ovom radu je uključena primena fuzzy logike i TOPSIS metode sa ciljem rangiranja kritičnih elemenata skretnice.

Radi jednostavnosti, koristimo trouglaste fuzzy brojeve da predstavimo lingvističke varijable u ovom radu. U literaturi (Cheng i Lin, 2002), trouglasti fuzzy broj A = (a1, a2, a3) je određen tako da je a1 < a2 < a3 (videti sliku 1). Vrednost funkcije  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  označava stepen pripadnosti x u  $\tilde{A}$ , tako da veći  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  znači veći stepen pripadnosti za x u  $\tilde{A}$ .

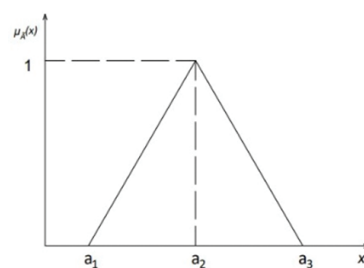
$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 < x < a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 < x < a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \tag{2}$$

Prema (Chen, 2000), rastojanje između dva trouglasta fuzzy broja A = (a1, a2, a3) i N = (n1, n2, n3) može se izvesti korišćenjem Verteks metode (3). Iako se jasna vrednost trouglastog fuzzy broja može prikazati korišćenjem različitih metoda defazifikacije, u ovom radu primenjujemo metodu Centroida (4).

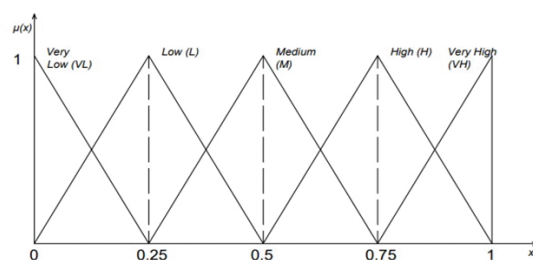
$$d(\tilde{A}, \tilde{N}) = \sqrt{\frac{[(a_1 - n_1)^2 + (a_2 - n_2)^2 + (a_3 - n_3)^2]}{3}} \tag{3}$$

$$x_0(\tilde{A}) = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3} \tag{4}$$

U okviru procesa donošenja odluka, stručnjaci često imaju tendenciju da koriste lingvističke varijable da bi se prilagodili nejasnoći sadržanoj u njihovim odlukama. Sledeći skupovi lingvističkih termina sa njihovim odgovarajućim trouglastim fuzzy brojevima (videti sliku 2) su usvojeni da izraze vrednosti lingvističkih varijabli kako bi se ponderisali faktori rizika i procenile ocene rizika od otkaza u odnosu na ove faktore.



Slika 1. Trouglasti fuzzy broj



Slika 2. Lingvističke promenljive

### 2.3. TOPSIS metoda

Metoda TOPSIS (Techniques for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) definiše rešenje iz krajnje grupe elemenata na osnovu mere udaljenosti od idealnog rešenja. Primena ovog principa mere udaljenosti od idealnog rešenja u TOPSIS-u eliminiše mogućnost subjektivnog odlučivanja (Olson, 2004). Rangiranje alternativa se zasniva na meri relativne bliskosti idealnom rešenju i meri relativne udaljenosti od anti-idealnog rešenja. Idealno rešenje predstavlja kombinaciju najboljih alternativnih vrednosti za svaki kriterijum, dok anti-idealno rešenje predstavlja kombinaciju najgorih alternativnih vrednosti za svaki kriterijum. Idealna i anti-idealna rešenja se definišu za svaki kriterijum posebno uzimajući u obzir da li je kriterijum minimizacionog ili maksimizacionog tipa. Algoritam TOPSIS metode sastoji se od sledećih koraka:

**Korak 1:** Formiranje matrice odlučivanja za alternative (A1, A2, ...Am) prema usvojenim kriterijumima (C1, C2, ...Cn), i kriterijumske funkcije (f1, f2, ...fn). Element matrice predstavlja vrednosti j funkcije kriterijuma za i-tu alternativu.

**Korak 2:** Normalizacija vrednosti matrice odlučivanja vrši se sa ciljem svođenja vrednosti na bezdimenzionalnu vrednost prema relaciji ispod (5).

$$x_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f_{ij}^2}} \quad (5)$$

**Korak 3:** Određivanje vrednosti težinskih koeficijenata (w1, w2, ...wn) i formiranje otežane normalizovane matrice. Element matrice vij predstavlja proizvod vrednosti težinskog koeficijenta wij i normalizovane vrednosti alternative xij.

**Korak 4:** Određivanje idealnog rešenja (A\*) i anti-idealnog rešenja (A-) kao kombinacije najbolje (vj\*) i najgore (vj) vrednosti alternativa po svim kriterijumima (6).

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\}, \quad A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-\} \quad (6)$$

**Korak 5:** Određivanje relativnih mera udaljenosti alternativa od idealnih rešenja (7).

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, \dots, m \quad (7)$$

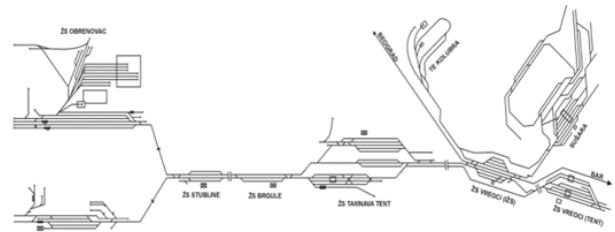
**Korak 6:** Određivanje relativne bliskosti idealnom rešenju (8).

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, \quad i = 1, \dots, m \quad (8)$$

**Korak 7:** Rangiranje alternativa prema relativnoj bliskosti idealnom rešenju.

### 3. ILUSTRATIVNI PRIMER

U ovom radu kao ilustrativan primer korišćena je mreža pruga industrijske železnice rudarskog basena „Kolubara“ (videti sliku 3), odnosno skretnica kao sistem i njeni elementi kao podsistem u stanici Sušara. Osnovna delatnost Rudarskog basena „Kolubara“ je proizvodnja uglja za proizvodnju električne energije. Rudarski basen „Kolubara“ je vodeći proizvođač uglja u Srbiji, na čijim površinskim kopovima se godišnje proizvede oko 30 miliona tona lignita. Taj iznos je oko 70 odsto ukupne proizvodnje uglja u okviru „Elektroprivrede Srbije“. Oko 52 odsto električne energije u Srbiji proizvodi se iz kolubarskog lignita.



Slika 3. Šematski prikaz mreže industrijske železnice „Kolubara“

S obzirom da je skretnica jedan od najvažnijih i najranjivijih delova železničke infrastrukture, potrebno je analizirati elemente skretnice i utvrditi koji od njih je najkritičniji, odnosno koji je izložen najvećem riziku od kvara. FMEA pristup je korišćen za analizu 13 komponenti jedne skretnice. Eksperti iz saobraćajnog inženjerstva (donosilac odluke 1 - DM1) i građevinarstva (donosilac odluke 2 - DM2) dali su svoje lingvističke ocene za faktore rizika: ozbiljnost (S), pojavu (O) i detekciju (D), koje su prikazane u tabeli. 4. Ovi faktori rizika se smatraju kriterijumima u modelu, dok se 13 komponenti skretnice razmatraju kao alternative.

Svaki donosilac odluka koristi lingvističke promenljive prikazane na slici 2 da bi dodelio ocene rizika elemenata skretnice (alternativa) u odnosu na specifični faktor rizika. Lingvističke ocene koje donosioci odluka daju ocenama alternativa i značaju kriterijuma prikazane su u tabeli 1 i tabeli 2. Lingvističke ocene prikazane u tabelama 1 i 2 su transformisane u trouglaste fuzzy brojeve. Fuzzy brojevi su agregirani na osnovu kojih se izvode subjektivne fuzzy težine kriterijuma i fuzzy ocene alternativa koje se odnose na svaki kriterijum kao u što je prikazano u tabeli

3. Nakon toga, vrednosti iz matrice se defazifikuju korišćenjem jednačine (4).

Tabela 1. Elementi skretnice i lingvističke fuzzy ocene prema faktorima rizika

RB	Elementi skretnice	DM <sub>1</sub>			DM <sub>2</sub>		
		S	O	D	S	O	D
1	Glavne šine	H	VL	H	H	L	H
2	Jezičci	VH	M	H	VH	H	H
3	Klizno jastuče	M	VH	L	M	VH	M
4	Spojna motka	M	M	L	H	M	L
5	Potezna motka	M	H	L	H	H	M
6	Postavljač	L	M	VL	M	M	VL
7	Vrh srca	VH	H	H	VH	H	H
8	Krilne šine	M	L	M	H	H	M
9	Šina vođica	VH	M	H	VH	H	H
10	Podložna ploča	L	L	H	M	M	H
11	Korenska podl.ploča	H	L	H	VH	M	VH
12	Prag	M	L	H	H	L	H
13	Tucanički zastor	H	M	L	H	M	H

Tabela 2. Značaj kriterijuma prema mišljenju eksperata

Kriterijumi	K <sub>1</sub> (S)	K <sub>2</sub> (O)	K <sub>3</sub> (D)
DM <sub>1</sub>	VH	L	M
DM <sub>2</sub>	VH	L	H

Tabela 3. Agregirane fuzzy ocene alternativa i subjektivni težinski koeficijenti kriterijuma

Kriter.	K <sub>1</sub> (S)	K <sub>2</sub> (O)	K <sub>3</sub> (D)
wj <sup>s</sup>	(0,75; 1; 1)	(0; 0,25; 0,5)	(0,25; 0,63; 1)
A <sub>1</sub>	(0,5; 0,75; 1)	(0; 0,13; 0,5)	(0,5; 0,75; 1)
A <sub>2</sub>	(0,75; 1; 1)	(0,25; 0,63; 1)	(0,5; 0,75; 1)
A <sub>3</sub>	(0,25; 0,5; 0,75)	(0,75; 1; 1)	(0; 0,38; 0,75)
A <sub>4</sub>	(0,25; 0,63; 1)	(0,25; 0,5; 0,75)	(0; 0,25; 0,5)
A <sub>5</sub>	(0,25; 0,63; 1)	(0,5; 0,75; 1)	(0; 0,38; 0,75)
A <sub>6</sub>	(0; 0,38; 0,75)	(0,25; 0,5; 0,75)	(0; 0; 0,25)
A <sub>7</sub>	(0,75; 1; 1)	(0,5; 0,75; 1)	(0,5; 0,75; 1)
A <sub>8</sub>	(0,25; 0,63; 1)	(0; 0,5; 1)	(0,25; 0,5; 0,75)
A <sub>9</sub>	(0,75; 1; 1)	(0,25; 0,63; 1)	(0,5; 0,75; 1)
A <sub>10</sub>	(0; 0,38; 0,75)	(0; 0,38; 0,75)	(0,5; 0,75; 1)
A <sub>11</sub>	(0,5; 0,88; 1)	(0; 0,38; 0,75)	(0,5; 0,88; 1)
A <sub>12</sub>	(0,25; 0,63; 1)	(0; 0,25; 0,5)	(0,5; 0,75; 1)
A <sub>13</sub>	(0,5; 0,75; 1)	(0,25; 0,5; 0,75)	(0; 0,5; 1)

U tabeli 4 je prikazana defazifikovana matrica, gde je od tri vrednosti iz tabele 3 prikazana jedna srednja vrednost, koja reprezentuje njih. Tabela 5 prikazuje subjektivne težinske koeficijente, koji su dobijeni tako da predstavljaju količnik određene vrednosti i ukupnog zbira tih vrednosti (npr.  $0.92:(0.92+0.25+0.63) = 0.51$ ). U narednoj tabeli 6 prikazane su normalizovane vrednosti za sve alternative dobijene kao količnik određene vrednosti i kvadratnog korena zbira kvadrata svih tih vrednosti po određenom kriterijumu (npr.  $0.75:(0.75^2+0.92^2+...+0.75^2)^{1/2}=0.297$ ). Ova tabela zapravo i predstavlja prvi korak i ulaz u TOPSIS metodu. Naredni korak predstavlja ponderisanje matrice, odnosno množenje svih vrednosti sa odgovarajućim težinskim koeficijentima što je prikazano u tabeli 7. Nakon toga prelazi se na određivanje idealnog i anti-idealnog rešenja (tabela 8), a zatim se određuje relativna mera udaljenosti alternativa od idealnih rešenja koristeći formule (7). Nakon toga određuje se relativna bliskost idealnom rešenju pomoću formule (8), videti tabelu 9. Na samom kraju je prikazan rang alternativa, odnosno kritični elementi skretnice.

Tabela 4. Defazifikovane vrednosti

Kriterijumi	K <sub>1</sub> (S)	K <sub>2</sub> (O)	K <sub>3</sub> (D)
wj <sup>s</sup>	0,92	0,25	0,63
A <sub>1</sub>	0,75	0,21	0,75
A <sub>2</sub>	0,92	0,63	0,75
A <sub>3</sub>	0,50	0,92	0,38
A <sub>4</sub>	0,63	0,50	0,25
A <sub>5</sub>	0,63	0,75	0,38
A <sub>6</sub>	0,38	0,50	0,08
A <sub>7</sub>	0,92	0,75	0,75
A <sub>8</sub>	0,63	0,50	0,50
A <sub>9</sub>	0,92	0,63	0,75
A <sub>10</sub>	0,38	0,38	0,75
A <sub>11</sub>	0,79	0,38	0,79
A <sub>12</sub>	0,63	0,25	0,75
A <sub>13</sub>	0,75	0,50	0,50

Tabela 5. Subjektivni težinski koeficijenti

Kriterijumi	K <sub>1</sub> (S)	K <sub>2</sub> (O)	K <sub>3</sub> (D)
wj <sub>s</sub>	0,51	0,14	0,35

Tabela 6. Normalizovane vrednosti

Kriterijumi	K <sub>1</sub> (S)	K <sub>2</sub> (O)	K <sub>3</sub> (D)
wj <sup>s</sup>	0,510	0,140	0,350
A <sub>1</sub>	0,297	0,102	0,340
A <sub>2</sub>	0,363	0,307	0,340
A <sub>3</sub>	0,198	0,451	0,170
A <sub>4</sub>	0,248	0,246	0,113
A <sub>5</sub>	0,248	0,369	0,170
A <sub>6</sub>	0,149	0,246	0,038
A <sub>7</sub>	0,363	0,369	0,340
A <sub>8</sub>	0,248	0,246	0,227
A <sub>9</sub>	0,363	0,307	0,340
A <sub>10</sub>	0,149	0,184	0,340
A <sub>11</sub>	0,314	0,184	0,359
A <sub>12</sub>	0,248	0,123	0,340
A <sub>13</sub>	0,297	0,246	0,227

Tabela 7. Ponderisana matrica

Kriterijumi	K <sub>1</sub> (S)	K <sub>2</sub> (O)	K <sub>3</sub> (D)
A <sub>1</sub>	0,152	0,014	0,119
A <sub>2</sub>	0,186	0,043	0,119
A <sub>3</sub>	0,101	0,063	0,059
A <sub>4</sub>	0,127	0,034	0,040
A <sub>5</sub>	0,127	0,051	0,059
A <sub>6</sub>	0,076	0,034	0,013
A <sub>7</sub>	0,186	0,051	0,119
A <sub>8</sub>	0,127	0,034	0,079
A <sub>9</sub>	0,186	0,043	0,119
A <sub>10</sub>	0,076	0,026	0,119
A <sub>11</sub>	0,161	0,026	0,125
A <sub>12</sub>	0,127	0,017	0,119
A <sub>13</sub>	0,152	0,034	0,079

Tabela 8. Idealno i anti-idealno rešenje

Kriterijumi	S	O	D
A*	VH	L	M
A-	VH	L	H

Tabela 9. Relativna bliskost idealnom rešenju i konačni rang

Kriterijumi	Si*	Si-	C	Rang
A <sub>1</sub>	0,1301	0,0596	0,314	5
A <sub>2</sub>	0,1550	0,0211	0,120	2
A <sub>3</sub>	0,0717	0,1072	0,599	11
A <sub>4</sub>	0,0606	0,1080	0,641	12
A <sub>5</sub>	0,0780	0,0893	0,534	10
A <sub>6</sub>	0,0200	0,1596	0,889	13
A <sub>7</sub>	0,1568	0,0132	0,078	1
A <sub>8</sub>	0,0856	0,0803	0,484	8
A <sub>9</sub>	0,1550	0,0211	0,120	2
A <sub>10</sub>	0,1062	0,1161	0,522	9
A <sub>11</sub>	0,1409	0,0450	0,242	4
A <sub>12</sub>	0,1171	0,0751	0,391	7
A <sub>13</sub>	0,1026	0,0640	0,384	6



Slika 4. Prikaz najkritičnijih elemenata skretnice

#### 4. DISKUSIJA REZULTATA I ZAKLJUČAK

U ovom radu posmatrana je skretnica, kao jedan od osnovnih i neophodnih elemenata za funkcionisanje železničkog saobraćaja. Skretnica je sistem od nekoliko elemenata. Svi sastavni elementi su veoma bitni i neophodno je da budu ispravni za normalno funkcionisanje skretnice. Metodom FMEA detaljno je posmatrano 13 elemenata. Stručnjaci iz oblasti saobraćaja i građevinarstva dali su svoje stručne lingvističke ocene za 3 ključna faktora rizika, a to su ozbiljnost (S), pojava (O) i detekcija (D), zbog čega je u ovom modelu primenjen fuzzy pristup. Nakon toga, TOPSIS metodom višekriterijumskog odlučivanja, određeni su elementi skretnice sa najvećom mogućnošću otkaza, sve do onih elemenata sa najmanjom mogućnošću otkaza. Kriterijumi su bili faktori rizika, dok su alternative elementi skretnice, njih 13.

Rezultati su pokazali da su najkritičniji elementi vrh srca (7), jezičci (2) i šine vođice (9). Ovi rezultati

pokazuju da su elementi koji predstavljaju ključne elemente skretnice upravo najugroženiji, s obzirom na to da trpe velika opterećenja od vozova. Potrebno ih je redovno kontrolisati i održavati. Elementi korenska podložna ploča (11), glavne šine (1) i tucanički zastor (13) su nešto manje izloženi riziku od najkritičnijih, ali ne treba zanemariti ni njihovo održavanje, jer njihov defekt ugrožava bezbednost saobraćaja i prekida saobraćaj. Elementi 3, 4, 5, 10 i 12 pripadaju grupi srednje rizičnih elemenata. Element sa najmanjim rizikom od kvara je postavljač (6).

Uz pomoć ovog modela mogu se na vrlo jasan i detaljan način odrediti potencijalno kritični elementi sistema, a kasnije i razmotriti koraci koje treba preduzeti u cilju smanjenja rizika.

### LITERATURA

- [1] Bellman RE, Zadeh LA, 1970. "Decision-making in a fuzzy environment", *Manag Sci*, vol. 17, no 4, pp 141-164.
- [2] Chen CT, 2000. "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment", *Fuzzy Sets Syst*, vol. 114, no 1, pp 1-9.
- [3] Cheng CH, Lin Y, 2002. "Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation", *Eur J Oper Res*, vol. 142, no 1, pp 174- 186.
- [4] Dindar S, Kaewunruen S, 2018. "Assessment of Turnout-Related Derailments by Various Causes". In: Pombo J, Jing G. (eds) *Recent Developments in Railway Track and Transportation Engineering. GeoMEast 2017. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-61627-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61627-8_2).
- [5] Dindar S, Kaewunruen S, An, M, Gigante-Barra A, 2017. "Derailment-based Fault Tree Analysis on Risk Management of Railway Turnout Systems", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 245, 042020 doi:10.1088/1757-899X/245/4/042020
- [6] Ebrahimi S, Vachal K, Szmerekovsky J, 2022. "A Delphi-FMEA model to assess county-level speeding crash risk in North Dakota", *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 16, no 1, pp 1-11.
- [7] Fu S, Yu Y, Chen J, Han B, Wu Z, 2022. "Towards a probabilistic approach for risk analysis of nuclear-powered icebreakers using FMEA and FRAM", *Ocean Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112041>
- [8] Ivić M, 2005. *Železničke pruge i stanice - postrojenja za vezu koloseka*, Saobraćajni fakultet, Beograd.
- [9] Mardani A, Jusoh A, Zavadskas EK, 2015. "Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - two decades review from 1994 to 2014", *Expert Syst Appl*, vol. 42, no 8, pp 4126-4148.
- [10] Olson D.L: Comparison of Weights in TOPSIS Models, *Mathematical and Computer Modelling* 40(2004)7-8, 721-727.
- [11] Ouyang L, Che Y, Yan L, Park C, 2022. "Multiple perspectives on analyzing risk factors in FMEA", *Computers in Industry*, vol. 141, pp 1-13.
- [12] Shafabakhsh G, Hadjihoseinlou M, Taghizadeh SA, 2014. "Selecting the appropriate public transportation system to access the Sari International airport by fuzzy decision making", *Eur Transp Res Rev*, vol. 6, no 3, pp 277-285.
- [13] Zadeh LA, 1965. "Fuzzy sets", *Inf Control*, vol. 8, no 3, pp 338-353.