

## Model višekriterijumskog odlu ivanja za pove anje robusnosti reda vožnje železnice

PREDRAG R. JOVANOVI , Univerzitet u Beogradu,  
Saobra ajni fakultet, Beograd

Originalni nau ni rad  
UDC: 656.2.022.5  
DOI: 10.5937/tehnika1701091J

*Železni ki sistem predstavlja jedan od najskupljih sistema države, kako sa aspekta izgradnje, tako i sa aspekta održavanja. Sa druge strane, on je neophodnost, posebno u gradovima i gusto naseljenim oblastima. Ta nost železni kog sistema je u direktnoj vezi sa stabilnoš u i robusnoš u svih tehnoloških procesa u njemu, pa i reda vožnje, kao jednog od najvažnijih me u njima. Ovaj rad definiše novi na in implementacije vremenskih rezervi u red vožnje u cilju pove anja njegove robusnosti, s obzirom na ograni enja proizašla iz iskoriš enja propusne mo i pruge. Razvijeni model uzima u obzir razna ograni enja nastala iz same tehnologije odvijanja železni kog saobra aja. Model je algoritamskog tipa korak-po-korak, na osnovu ega se može do i do mesta primene vremenskih rezervi na posmatranoj deonici pruge u cilju pove anja robusnosti reda vožnje.*

**ključne reči:** red vožnje, kašnjenje vozova, robusnost, kapacitet pruge, višekriterijumsko odlu ivanje

### 1. UVOD

Red vožnje sadrži koordinaciju rada svih elementa železni kog sistema. Njime se uskla uju sve potrebe za prevozom. Odstupanja od reda vožnje do vode do neregularnosti u saobra aju vozova, koje, u zavisnosti od nivoa poreme aja, mogu dovesti do otežanog funkcionisanja sistema u celini. Poreme aji u „hodu vozova” ne ugrožavaju samo vozove iji je red vožnje direktno narušen, ve , naj eš e, dolazi do prostiranja kašnjenja kroz red vožnje, njihovog prenošenja sa jednog voza na drugi, i to ne samo na posmatranoj pruzi, ve i na priklju nim prugama.

Kašnjenja vozova predstavljaju odstupanje od, redom vožnje, planiranog vremena realizacije nekog doga aja. Ukoliko je primarno kašnjenje nekog doga aja ve e od vremenske rezerve, umetnute izme u njega i susednog doga aja sa kojim postoji interakcija, kašnjenje e biti preneto i na ugroženi, susedni doga aj. Na taj na in nastaju sekundarna kašnjenja. Iznose sekundarnih kašnjenja prakti no nije mogu e unapred utvrditi [1].

Uzimaju i u obzir kašnjenja, posebno njihove tipove, mogu e je definisati robusnost reda vožnje, kao

---

Adresa autora: Predrag Jovanovi , Univerzitet u Beogradu, Saobra ajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305, p.jovanovic@sf.bg.ac.rs

Rad primljen: 14.12.2016.

Rad prihva en: 19.01.2017.

jednu od osnovnih karakteristika reda vožnje sa aspekta ta nosti i pouzdanosti [2].

Robusnost reda vožnje predstavlja sposobnost reda vožnje da se odupre kašnjenjima koja mogu nastati u njemu. Prakti no, red vožnje je robusniji što je više u stanju da umanja ili potpuno neutrališe transfer kašnjenja sa zakasnelih vozova na druge.

Robusnost reda vožnje je direktno zavisna od vremenskih rezervi koje su implementirane u red vožnje. Implementacija vremenskih rezervi u tehnološke intervale izme u trasa umanjuje, ili potpuno onemogućava, transfer kašnjenja sa jednog voza na drugi, pa se ove vremenske rezerve smatraju parametrima robusnosti reda vožnje.

Kapacitet železni ke infrastrukture, sa zna ajnim rastom saobra aja, poslednjih godina se pokazao kao deficitaran resurs. Kada se govori o kapacitetu, prvenstveno se misli na propusnu mo pruge. Sa tog aspekta, svaku vremensku rezervu u redu vožnje možemo smatrati vremenskim gubitkom.

Sama implementacija vremenskih rezervi u ve projektovani red vožnje, može se posmatrati kao problem alokacije, pri emu karakteristike reda vožnje i železni ke infrastrukture name u brojna ograni enja. Osnovni cilj ovog rada je utvr ivanje prioriternih tehnoloških intervala koje treba posebno zaštititi vremenskim rezervama, kako bi se pove ala robusnost reda vožnje, uz koriš enje usvojenih vrednosti vremenskih rezervi.

U ovom radu problem alokacije vremenskih rezervi u isplanirani red vožnje se rešava primenom više-kriterijumskog odlu ivanja, zasnovanog na prethodno definisanim kriterijumima za utvr ivanje prioriteta alokacije.

## 2. KRITERIJUMI ZA PRIORITETNU ALOKACIJU VREMENSKIH REZERVU

U fazi projektovanja reda vožnje ne raspolaže se preciznim podacima o iskoriš enju kapaciteta. Problem predstavlja injenica da, u naj eš em broju slu ajeva, nije mogu e svaku trasu zaštititi vremenskom rezervom. Tada konstruktor mora odlu iti koju trasu i na kom mestu treba zaštititi. Da bi ovo bilo mogu e, definisani su kriterijumi na osnovu kojih e biti mogu e ustanoviti prioritet pojedinih doga aja u redu vožnje. Ideja za utvr ivanje prioriteta mesta za lociranje vremenskih rezervi je zapravo nastala kao proširenje pristupa [3], u kome su kao kriti ne ta ke definisana mesta preticanja vozova. U ovom radu, svaka interakcija dve trase predstavlja potencijalno mesto za implementaciju vremenskih rezervi. Tako e, u navedenom radu, jedini kriterijum za donošenje odluke predstavlja iznos ve implementiranih dopunskih voz-nih vremena, dok se u ovom radu posmatra ve i broj kriterijuma. Ideja za razvoj kompleksnih kriterijuma za utvr ivanje prioriteta zaštite, nastala je iz ocena grupe eksperata pri definisanju i ocenjivanju tehnoloških kriterijuma u radu [4], a prvi put su kriterijumi formalno definisani u [5].

### 2.1. Kriterijum zaštite vozova ve eg ranga

Posmatrano intuitivno, u slu aju sastajanja vozova razli itih rangova trebalo bi u ve oj meri štititi trasu voza ve eg ranga. Me utim, ovo ne sme biti jedini kriterijum, jer bi bilo nemogu e doneti odluku kada su trase istog ranga. Kada je sastajanje takvo da u stanicu sastajanja najpre stiže voz manjeg ranga, pufer vremenom, ve im od prose nog, treba zaštititi trasu voza ve eg ranga, od eventualnog prenošenja kašnjenja. Na taj na in, rang vozova uti e na vrednost pufer vremena. Kada postoji više od jednog ovakvog slu aja, i u slu aju kada je raspoloživo pufer vreme koje se može implementirati ograni eno i manje od sume svih potrebnih pufer vremena, mora se izabrati trasa koja e se vremenskom rezervom zaštititi. Isklju ivo na osnovu ranga vozova takvu odluku nije mogu e doneti.

Zbog navedenih nedostataka, u modelu koji je razvijen u radu, rang voza nije posmatran kao nezavisan kriterijum, ve je uveden modifikovani pokazatelj, koji omogu uje direktno pore enje dva rizi na mesta u redu vožnje, sa aspekta utvr ivanja prioriteta zaštite od eventualne pojave kašnjenja, vode i ra una i o preostaloj dužini relacije saobra aja posmatranog voza.

Kombinacijom dva navedena elementa, sa dovoljnim nivoom preciznosti, zna aj pojedinih tehnoloških intervala za implementaciju pufer vremena izme u trasa vozova u stanici  $S$  trebalo bi odre ivati iz pokazatelja „modifikovani rang voza”, koji uzima u obzir izmenjeni rang voza u odnosu na dužinu preostalog dela relacije:

$$\rho = \frac{r_i \cdot 10^3}{\sum_{MSR=S}^{MSR} l_{msr}} \quad (1)$$

gde je:

- ... – koeficijent modifikovanog ranga voza,
- $r_i$  – rang voza iju trasu pufer vreme treba da štiti,
- $S$  – stanica u kojoj je formiran tehnološki interval iji prioritet zaštite se utvr uje,
- $msr$  – me ustani no rastojanje kojem pripada stanica  $S$ ,
- $MSR$  – ukupan broj me ustani nih rastojanja na posmatranoj pruži ili deonici pruge, pri emu važi  $MSR = NS - I$  i
- $\sum_{MSR=S}^{MSR} l_{msr}$  – preostala dužina relacije posmatranog voza, u zavisnosti od smera saobra aja.

Rang voza,  $r_i$ , može uzeti vrednosti od 1, koju uzimaju vozovi najnižeg ranga, do ukupnog broja razli itih kategorija vozova, koji saobra aju kroz posmatranu stanicu.

Što je ve i koeficijent modifikovanog ranga voza, bi e ve i i prioritet njegove zaštite, odnosno prioritet alokacije pufer vremena u posmatrani tehnološki interval. Kako ovaj koeficijent opada sa pove anjem preostale dužine relacije, jasno je da se na ovaj na in favorizuje mogu nost da se i na preostalom delu relacije istoj trasi doda još vremenskih rezervi.

### 2.2. Kriterijum ranije lociranih vremenskih rezervi u prethodnom prevoznom putu

Pri dolasku voza u stanicu sastajanja, mogu nastati samo dva slu aja: da voz saobra a po redu vožnje ili da voz kasni. U momentu konstrukcije reda vožnje nemogu e je znati koji slu aj e u kom danu nastati, a ak nije mogu e ni znati koji e slu aj biti u ustaliji za vreme važenja reda vožnje. Jednostavno je po i od pretpostavke da e slu aj kada voz sa zakašnjenjem dolazi na sastajanje biti manje verovatan ukoliko je trasa voza, od polazne stanice do stanice sastajanja, zašti ena ve im vrednostima vremenskih rezervi. Drugim re ima, ve i prioritet bi trebalo dati lociranju pufer vremena u one tehnološke intervale kod kojih prvi voz u intervalu ima manje vremenskih rezervi u, do tada, pre enom putu.

Kako relacije saobra aja nisu za sve vozove iste, ne smeju se u razmatranje uzimati proste sume vremenskih rezervi. Da bi se ovo prevazišlo, uveden je pokazatelj „gustina alokacije vremenskih rezervi”. Sam po sebi, pokazatelj se može definisati na više

na ina, s obzirom na rezerve u pređenom putu i s obzirom na rezerve u vremenu puta.

U ovom slučaju pokazatelj gustina alokacije vremenskih rezervi je definisan kao odnos ukupne sume vremenskih rezervi i rastojanja, koje je voz prešao do posmatrane tačke:

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{res} + \sum_{S=2}^S t_S^{dw-buff}}{\sum_{mSR=1}^{S-1} l_{mSR}} \quad (2)$$

gde je:

- $X_l$  – gustina alokacije vremenskih rezervi,
- $\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{res}$  – suma dopunskih vremena vožnje na svakom od međustani njih rastojanja,
- $\sum_{S=2}^S t_S^{dw-buff}$  – suma rezervi u vremenima bavljenja u svim stanicama do stanice  $S$  i
- $\sum_{mSR=1}^{S-1} l_{mSR}$  ili – dužina relacije posmatrane trase od prve stanice do stanice  $S$ .

Ovako definisana, gustina alokacije vremenskih rezervi predstavlja prosečan iznos vremenskih rezervi, raspoređenih po jednom kilometru pređenog puta. Ukoliko je gustina alokacije vremenskih rezervi veća, znači da je trasa voza, na prethodnom prevoznom putu bolje zaštićena od eventualnih poremećaja, te da je smanjena mogućnost zakasnelog dolaska voza u stanicu  $S$ . Da bi se omogućio princip maksimizacije, umesto gustine alokacije vremenskih rezervi treba koristiti pokazatelj „brzina potrošnje vremenskih rezervi”, izveden kao recipročna vrednost gustine alokacije.

### 2.3. Kriterijum vremenskih rezervi s obzirom na minimalno vreme putovanja

Analogno prethodnom kriterijumu pokazatelj „gustina alokacije vremenskih rezervi” se može konstruisati i u odnosu na minimalno vreme putovanja voza koji prvi pristizuje na sastajanje. Motiv za ovaj način

$$\gamma_3 = \frac{\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{res} + \sum_{S=2}^S t_S^{dw-buff}}{\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{travel} + \sum_{S=2}^S t_S^{dwell} + \sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{res} + \sum_{S=2}^S t_S^{dw-buff}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

### 2.5. Kriterijum uticaja velikih železnih vorova na prevoznom putu voza

Kriterijum uticaja velikih vorova, kroz koje bi voz na preostalom delu svoje trase trebao da prođe, ne zahteva posebno definisanje, jer je jednoznačan: ukoliko je predviđeno da na preostalom delu svoje relacije voz prođe kroz velike vorove, sa velikim obimom saobraćaja na mestima gde se pruge u vor uključuju, postoji mogućnost da voz zakasni.

Zato je važno da se vozovima koji u vor ulaze obezbedi dovoljno rezervi, kako bi u vor pristizali bez kašnjenja i, na taj način, omogućiti nastanak

definisanja ovog pokazatelja nastaje iz činjenice da je planirano vreme putovanja vozova direktno srazmerno dužini relacije, a na ovaj način se povećava mogućnost da se zaštite i trase vozova nižih kategorija.

Prema ovom kriterijumu pokazatelj „gustina alokacije vremenskih rezervi” definišemo kao odnos minimalnog vremena putovanja dolazećeg voza i sume vremenskih rezervi koje su posmatranoj trasi već dodeljene. Bitno je ista i da se u ovom slučaju u obzir posebno uzimaju minimalna vremena vožnje, kao i planirana vremena bavljenja odnosnog voza, a posebno rezerve koje se ovim vremenima dodaju, pa pokazatelj „gustina alokacije vremenskih rezervi” određujemo kao:

$$\gamma_2 = \frac{\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{travel} + \sum_{S=2}^S t_S^{dwell}}{\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{res} + \sum_{S=2}^S t_S^{dw-buff}} \quad (3)$$

gde je:

- $\sum_{mSR=1}^{S-1} t_{mSR}^{travel}$  ili  $\sum_{mSR=S}^{MSR} t_{mSR}^{travel}$  – suma voznih vremena, istih i dodatnih za polazak i zaustavljanje, na pređenim međustanim rastojanjima i
- $\sum_{S=2}^S t_S^{dwell}$  ili  $\sum_{S=S}^{NS-1} t_S^{dwell}$  – suma planiranih vremena bavljenja, od stanice pokretanja voza do stanice  $S$ .

### 2.4. Kriterijum učešća vremenskih rezervi u vremenu putovanja

Prema ovom kriterijumu razmatra se procentualno učešće vremenskih rezervi u vremenu putovanja voza koji prvi pristizuje na sastajanje. Veći prioritet zaštite treba da imaju oni događaji koji tehnološke intervale grade sa dolazećim vozovima u kojima je ukupnim vremenima putovanja procentualno manje vremenskih rezervi, tj. pokazatelj „procentat vremenskih rezervi” definišemo kao:

minimalnih poremećaja reda vožnje, ili, u idealnom slučaju, odsustvo poremećaja.

Imaju i ovo u vidu, veći prioritet za zaštitu imaju trase kojima predstoji prolazak kroz više vorova i stanica sa velikim obimom saobraćaja u njima.

Prioritet za alokaciju vremenskih rezervi, po ovom kriterijumu, određuje se tako što se broj velikih vorova kroz koje prolazi posmatrana trasa uveća za 1.

Takođe, isti se da se pri ovom kriterijumu posmatra trasa voza koji kasnije dolazi na sastajanje, tj. ona trasa koju puffer vreme treba da zaštititi. Detaljnija objašnjenja o načinu definisanja i predstavljanja

kriterijuma za utvrđivanje prioriteta za alokaciju vremenskih rezervi, data su u [6].

### 3. DIMENZIONISANJE VREMENSKIH REZERVU

Vremenske rezerve koje se dodaju minimalnim tehnološkim intervalima prvenstveno imaju za cilj da spreče proširivanje manjih kašnjenja kroz red vožnje, tj. da umanje ili neutrališu sekundarna kašnjenja. Ova dodatna vremena, tj. pufer vremena, treba da apsorbiraju deo ili celo primarno kašnjenje zakasnelog voza, da bi se sprečilo nastanak domino efekta, posebno na delovima infrastrukture sa velikim iskorišćenjem.

Vrednosti ovih pufer vremena su danas samo deterministički određene, i to od željezničke uprave do uprave, na taj način što je unapred određena minimalna vrednost pufer vremena koje treba da se doda u zavisnosti od različitih kombinacija sastajanja vozova u službenim mestima. Većina uprava se rukovodi sledećim principom:

- „velika“ vrednost pufer vremena kada je uzastopni voz većeg ranga od prethodnog,
- „srednja“ vrednost pufer vremena kada su vozovi istog ranga i
- „mala“ vrednost pufer vremena kada je uzastopni voz manjeg ranga od prethodnog.

Ta ne, pa čak ni približne vrednosti malog, srednjeg ili velikog pufer vremena nisu propisane, već je na svakoj željeznici koju upravlja da ih definiše prema svojim potrebama (željenom kvalitetu prevozne usluge) i karakteristikama.

U razvijenom modelu korišćene su sledeće vrednosti pufer vremena:

- kao „velika“ vrednost pufer vremena usvojena su 3 minuta,
- „srednja“ vrednost pufer vremena iznosi 2 minuta,
- „mala“ vrednost pufer vremena predstavljena je jednim minutom.

### 4. MODEL VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLU IVANJA ZA POVE ANJE ROBUSNOSTI

Razvijeni model je u osnovi dosta pravolinijski, u smislu logike koju sledi. Naime, na osnovu definisanih kriterijuma za utvrđivanje značajnih pojedinih vremenskih rezervi, moguće je primena bilo koje od brojnih metoda višekriterijumske analize i odlučivanja. Ipak, u ovom modelu je iskorišćena metoda Analitičkog hijerarhijskog procesa, AHP. Razlozi za ovakvu odluku su, jednostavnost primene metode, ali i činjenica da donosilac odluke može primeniti metodu i bez potpunog znanja svih vrednosti parametara robusnosti.

Za primenu AHP metode u ovom modelu, svaki kandidat za implementaciju pufer vremena predstavlja

jednu alternativu. Kao cilj, postavljen je rang pojedinih alternativa.

Primena modela samo na ograničavajućem MSR-u povukla bi više praktičnih nedostataka. Svakako najveće u bi predstavljalo to da se kompresija reda vožnje vrši na samo jednom meustani nom rastojanju, što može dovesti do toga da, nakon implementacije pufer vremena, tj. proširenja vremenskim rezervama, red vožnje postane neodrživ. Naime, model koristi ukupno raspoloživo vreme na meustani nom rastojanju, ne razmatrajući da li je poslednji događaj u periodu posmatranja njegov deo. Kada to nije slučaj, proširenje reda vožnje vremenskim rezervama bi dovelo do toga da poslednji događaj u periodu posmatranja „iskorišćen“ i pređe u naredni period, što bi dovelo do nemogućnosti realizacije reda vožnje.

Drugi problem bi predstavljala činjenica da je saobraćaj nekog voza po nekom meustani nom rastojanju nezavisan u odnosu na događaje sa ostalih meustanih rastojanja. Može se naime dogoditi da pomeranje neke trase „u desno“ na ograničavajućem meustani nom rastojanju, umanjiti, ili čak potpuno izbriše vremenske rezerve izmeću dva proizvoljna događaja, na delu izmeću nekih drugih stanica.

Zbog svega ovoga, razvijen je model koji omogućava prevazilaženje nabrojanih praktičnih problema. Najpre je primenjen na izbor sabijanja reda vožnje na celoj pruzi, detaljno opisan u [6] i [7].

Iz svega navedenog proističe i osnovni problem koji se postavlja u fazi projektovanja modela za primenu na celoj pruzi. Naime, osnovni izazov se sastoji u tome da je neophodno utvrditi uticaj svakog pojedinačnog, dodeljenog pufer vremena na poslednje događaje na svakom od meustanih rastojanja, u celom periodu posmatranja. Sa druge strane, primena modela na celoj pruzi, drastično povećava broj tehnoloških intervala koji postaju kandidati za implementaciju pufer vremena. Sa aspekta modela višekriterijumskog odlučivanja, ovo je nepovoljno zbog povratne sprege u njemu, koji zahteva višestruko ponavljanje primene AHP metode višekriterijumskog odlučivanja.

Nakon što se izvrši kompresija reda vožnje, postavlja se pitanje koliko je raspoloživog vremena preostalo za povećanje robusnosti. Već je naglašeno da se ne sme dopustiti da bilo koji događaj „pređe“ iz perioda posmatranja u naredni period. Međutim, s obzirom na opisane načine kompresije reda vožnje, koji sada pomera kompletne trase, a ne samo njihove segmente na jednom meustani nom rastojanju, može se dogoditi da implementacija neke vremenske rezerve ne izazove pomeranje ni jednog od poslednjih događaja. Ovakvi kandidati su definisani kao „besplatni puferi“, jer ne crpe kapacitet. Zato, se u modelu

koji se može primeniti na celoj pruži raspoloživi kapacitet definiše posebno, za svako me ustani no rastojanje, i to tako što se najpre odrede fiktivni tehnološki intervali koje bi poslednji doga aji u periodu posmatranja, na me ustani nim rastojanjima, gradili sa po etnim doga ajima iz narednog perioda, a zatim se za tu vrednost umanju vremenski interval izme u njih.

Kao što se može dogoditi da neki od kandidata ne pomera ni jedan od poslednjih doga aja na me ustani nom rastojanju, može se dogoditi da neki od njih izaziva pomeranje poslednjih doga aja na nekim, ali ne na svim me ustani nim rastojanjima. Tako e, može se razlikovati vrednost, za koliko e do i do pomeranja poslednjih doga aja, po me ustani nim rastojanjima.

Iako primena modela na celoj pruži zna ajno usložnjava problem, sam model višekriterijumskog odlu ivanja zadržava jednostavnost. Algoritam predloženog modela za pove anje robusnosti reda vožnje primenom višekriterijumskog odlu ivanja, prikazan je na slici 1.

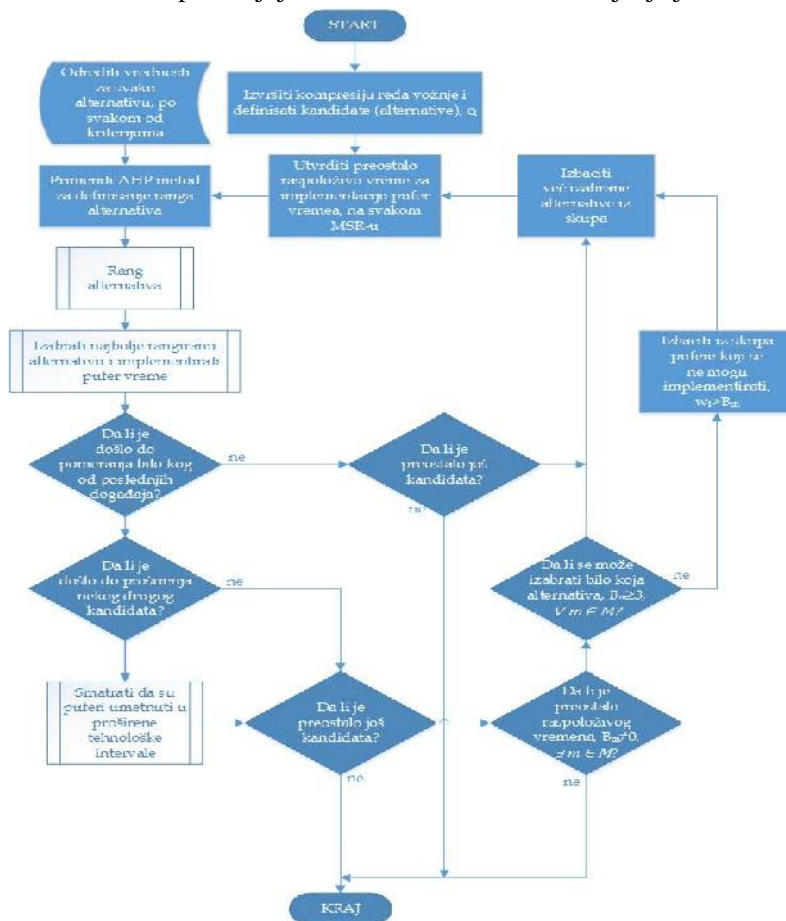
Nakon primene AHP metode i formiranja rang liste alternativa, najbolje rangirani tehnološki interval zaštiti uje se adekvatnim pufer vremenom. Sada se uvodi prva povratna sprega: ukoliko je implementirano pufer vreme „besplatno“, ono se primenjuje, a ceo

postupak odlu ivanja se ponavlja, kao posledica aksioma o ekivanja AHP metode. Ukoliko je implementacija pufer vremena dovela do pomeranja nekog od poslednjih doga aja, na nekom od posmatranih me ustani nih rastojanja, postupak e se ponoviti, pod uslovom da prvi nije ujedno i jedini kandidat.

Slede a povratna sprega je uvedena da bi se utvrdilo da li implementacija nekog pufer vremena, sa sobom povla i nenamerno proširivanje još nekog tehnološkog intervala – kandidata, osim onog ije je pufer vreme uneto u red vožnje.

Ovo je uvedeno, pre svega, da bi se model ostavio funkcionalnim i kada se kao kandidati razmatraju sve vremenske rezerve, uklju uju i i one u vremenima vožnje vozova, jer one ne mogu biti relaksirane. Za primenu u modelu u ovom radu, ovaj korak odlu ivanja je mogao biti izostavljen.

Pri ponavljanju višekriterijumskog odlu ivanja neophodno je, u svakoj iteraciji redefinisati preostalo raspoloživo vreme, po svim me ustani nim rastojanjima. Ovo je posledica ve opisanog uticaja svakog potencijalnog pufer vremena na pomeranje trasa na me ustani nim rastojanjima. Ukupan broj me ustani nih rastojanja je ozna en sa  $M$ .



Slika 1 - Algoritam modela za pove anje robusnosti na celoj pruži primenom AHP metode

## 5. PRIMENA MODELA ZA POVEĆANJE ROBUSTNOSTI REDA VOŽNJE

Model je primenjen na segmentu mreže železnica Švedske. Razmatran je vršni, dvoasočni period, između stanica Hallsberg i Mjölby. U pitanju je deo koridora kojim se velike količine rude dopremaju sa severa Švedske na jug, dalje do Göteborg-a, Helsingborg-a i Malmö-a.

Izabran je segment od 95,3 kilometara, pri čemu je pruga u dužini od 47,7 km, jednokolosečnik, a preostali deo dvokolosečnik. Deonica je podeljena na dvanaest

me ustanih nihanja, od toga se sedam me ustanih nihanja nalazi na jednokolosečnik deonici. U vršnom periodu prugom saobraćaju 18 vozova.

Nakon toga, određuju se vrednosti po definisanim kriterijumima, za svaki od kandidata. Kriterijumi su označeni rimskim brojevima od I do V (prema poglavlju 2), a vrednosti, za sve kandidate, po svakom od kriterijuma, prikazane su u tabeli 1.

Izbor alternativa je izvršen prema algoritmu datom na slici 1, kroz ukupno sedam iteracija.

Tabela 1. Vrednosti kandidata, po svim primenjenim kriterijumima

	Između dogadjaja	Kriterijum I	Kriterijum II	Kriterijum III	Kriterijum IV	Kriterijum V
1	4-12	34.48	1.00	11.60	5.80	4.00
2	19-28	13.19	20.50	7.48	30.93	3.00
3	23-26	14.53	14.50	4.30	3.93	3.00
4	41-42	15.29	11.77	6.42	27.47	3.00
5	56-60	40.27	12.69	9.95	12.69	4.00
6	57-58	17.12	7.54	8.12	25.13	3.00
7	60-62	100.67	1.35	12.47	1.35	4.00
8	77-78	33.44	5.53	5.22	3.52	3.00
9	104-109	27.10	3.91	3.13	3.73	2.00
10	109-110	92.59	3.60	5.78	10.80	3.00
11	118-120	85.47	3.90	1.00	4.88	3.00
12	123-126	56.18	16.48	4.22	8.90	2.00
13	126-127	96.15	4.27	1.13	2.60	1.00

Bitno je ista i da su koeficijenti nekonzistentnosti mali, i kreću se od 0,001 u prvoj iteraciji do 0,019 u četvrtoj, kada je i bio maksimalan. Ovo je pokazatelj da su odnosi između kriterijuma dobro definisani, ali ne predstavlja iznenađenje, s obzirom da su ti odnosi u razvijenom modelu određeni prema realnim vrednostima. U slučajevima kada donosilac odluke ne raspolaze realnim i preciznim vrednostima, Satijeva skala može se koristiti za definisanje svih navedenih međusobnih odnosa. Ukoliko koeficijent nekonzistentnosti prelazi 10%, kvalitet rezultata se ne može smatrati dobrim, pa proces treba ponoviti, sa drugom definisanim međusobnim odnosima, po nivoima.

## 6. ANALIZA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Nakon primene modela, izvršene su izmene u redu vožnje, u skladu sa dobijenim rezultatima. Da bi bilo

može porediti dobijene rezultate izvršen je skup nezavisnih simulacija, posebno za modifikovani i originalni red vožnje. U tu svrhu je iskorisćen model za simulaciju linearnih sistema primenom max-plus algebre [2]. Da bi se simulirao uticaj različitih kašnjenja na red vožnje, realizacija svakog reda vožnje je simulirana 500 puta, kroz zajednički, prethodno generisani kašnjenja. Poređenje su najpre izvršena prema kašnjenjima, a rezultati su prikazani u tabeli 2.

Iz tabele je očigledno da predloženi model daje bolje rezultate od originalnog reda vožnje. Procentualna poboljšanja iznose 5,97% smanjenja ukupnih kašnjenja, 6,01% smanjenja kašnjenja po jednom minutu inicijalnog kašnjenja, odnosno 5,95% smanjenja kašnjenja po jednom zakasnelom dogadjaju. Pri tome, model za povećanje robustnosti dominira nad originalnim u 398 od 500 ponavljanja.

Tabela 2. Prosečna kašnjenja po jednoj izvršenoj simulaciji, za sve redove vožnje

	Prosečno ukupno kašnjenje, po simulaciji [min.]	Prosečno kašnjenje po jednom dogadjaju, po simulaciji [min.]	Prosečno kašnjenje po 1 minutu inicijalnog kašnjenja [min.]	Prosečno kašnjenje po jednom inicijalno zakasnelom dogadjaju [min.]
Originalni	1184,970	8,78	9,16	50,41
Model VKO	1114,282	8,25	8,61	47,41

Može se zaključiti da razvijeni model smanjuje kašnjenja i poveća robusnost reda vožnje, poštujući ograničenja koja nastaju iz tehnologije odvijanja željezničkog saobraćaja. Razvijeni model poseduje relativno jednostavna ograničenja, što garantuje mogućnost njegove primene na svim nivoima odlučivanja. Dominacija nad originalnim redom vožnje potvrđuje pouzdanost i kvalitet razvijenog modela.

#### LITERATURA

- [1] Hansen I. A., Goverde, R. P. M.; Van der Meer D. J., Online train delay recognition and running time prediction, in *Proc 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Madeira Island, Portugal, pp. 1783–1788., 19-22 September 2010.
- [2] Goverde R. M. P., *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis*, PhD Thesis. Delft University of Technology, 2005.
- [3] Andersson E. V., Peterson A., and Törnquist Krasmann J, Quantifying railway timetable robustness in critical points, *Journal of Rail Transport Planning and Management*, vol. 3, no. 3, pp. 95–110, 2013.
- [4] Mandić D, Jovanović P, and Bugarinović M, Two-phase model for multi-criteria project ranking: Serbian Railways case study, *Transport Policy*, vol. 36, pp. 88–104, 2014.
- [5] Jovanović P, Mandić D, and Ivanović D, Ranking of Headways Priority in Railway Timetable in *Proceedings of XVI International Scientific-expert Conference on Railways, RAILCON '14*, Niš, Serbia, pp. 151–155., 9-10 October 2014.
- [6] Jovanović P, *Modeliranje parametara robusnosti reda vožnje železnice*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Srbija, 2016.
- [7] Jovanović P, Kecman P, Bojović N, and Mandić D, Optimal allocation of buffer times to increase train schedule robustness, *European Journal of Operational Research*, vol. 256, pp. 44-54, 2017.

#### SUMMARY

##### MULTI CRITERIA DECISION MAKING MODEL TO INCREASE RAILWAY TIMETABLE ROBUSTNESS

*Railway system is one of the most expensive systems of each country, from aspect of construction and of maintenance, as well. On the other hand, it is a necessity, especially in cities and densely populated areas. Accuracy of the railway system is directly related to the stability and robustness of all technological processes in it, including timetable, as one of the most important among them. The aims of this paper is to define the mode of implementation of time reserves in the timetable in order to increase its robustness, as well as the dimensioning the size of those reserves, given the constraints arising from the utilization of railway line capacity. The developed model take into account the various limitations resulting from the technology of railway traffic itself. The model is of algorithmic type step-by-step, and on the basis of that, the place of application of time reserves at observed section of the railway line can be reached, in order to increase the robustness of the timetable.*

**Key words:** *timetable, train delays, robustness, railway line capacity, multicriteria decision making*