

SNEŽANA MLADENOVIĆ¹, SLAVKO VESKOVIĆ²,
SLAĐANA JANKOVIĆ³, SLAVIŠA AĆIMOVIĆ⁴, IRINA BRANOVIĆ⁵

SOFTVER ZA REŠAVANJE POREMEĆAJA U ŽELEZNIČKOM REDU VOŽNJE

SOFTWARE FOR SOLVING DISTURBANCES IN TRAIN TIMETABLE

Datum prijema rada: 4.4.2016. god.

UDK: 656.022.5:004.4

REZIME

Rešavanje poremećaja reda vožnje je svakodnevni zadatak operativnog železničkog upravljanja. Oporavak reda vožnje je najčešće značajno složeniji zadatak od inicijalnog projektovanja reda vožnje koje se obavlja na nivou taktičkog planiranja. Razlozi za to su sledeći: ovaj zadatak zahteva visok stepen hitnosti, ne postoji univerzalni optimizacioni kriterijum primenljiv u svim situacijama, neke potrebne informacije mogu biti nedostupne, najčešće se radi o problemu kombinatorne optimizacije velikih dimenzija. U radu je problem operativne rekonstrukcije reda vožnje modeliran kao job shop scheduling problem i rešavan raspoloživim constraint programming softverskim alatom. Poređena su rešenja do kojih je došao realizovani softver sa rešenjima iskusnog dispečera. Eksperimenti su potvrdili sposobnost modela i softvera da pruže podršku operativnom železničkom upravljanju. **Ključne reči:** železnica, red vožnje, poremećaj, operativno upravljanje, softver, job shop scheduling problem

SUMMARY

Solving timetable disturbances is a daily task of operational railway control. The timetable recovery usually represents a significantly more complex task of designing the initial timetable, which is done at the level of tactical planning. The reasons for this are the following: this task requires a high degree of urgency; there is no universal optimization criterion applicable to all the situations; some necessary information may be unavailable; it is mostly about a large size combinatorial optimization problem. In this paper, the problem of the operational reconstruction of timetable is modeled as a job shop scheduling problem and solved by the available constraint programming software tool. The solutions obtained by the implemented software are compared with the solutions of experienced dispatchers. Experiments have confirmed the ability of the model and software to support the operational railway control. **Key words:** railway, timetable, disturbance, operational control, software, job shop scheduling problem

1. UVOD

Problem raspoređivanja trasa vozova (engl. *train scheduling*) je poznat kao NP-težak problem, odnosno nije poznat algoritam za rešavanje ovog problema koji će se okončati u polinomijalnom vremenu [1]. Problem raspoređivanja trasa vozova za veći fragment

železničke mreže, za duži vremenski period i veći broj vozova je deo projektovanja reda vožnje koje se obavlja na nivou taktičkog planiranja na železnici. Inicijalni red vožnje često mora biti modifikovan zbog saobraćajne nezgode, prirodne katastrofe, tehničkih problema, ljudskog faktora, itd. Operativno upravljanje u železničkom saobraćaju treba da koriguje aktuelni

1 Prof. dr Snežana Mladenović, dipl. mat, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Vojvode stepe 305, Beograd, snezanam@sf.bg.ac.rs

2 Prof. dr Slavko Vesković, dipl. inž. saob, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Vojvode stepe 305, Beograd, veskos@sf.bg.ac.rs

3 Doc. dr Slađana Janković, dipl. inž. saob, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Vojvode stepe 305, Beograd, s.jankovic@sf.bg.ac.rs

4 Slaviša Aćimović, dipl. inž. saob, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Vojvode stepe 305, Beograd, s.acimovic@sf.bg.ac.rs

5 Dr Irina Branović, dipl. inž. elek, Matematički Institut Srpske akademije nauka i umetnosti, Knez Mihailova 35, Beograd, ibranovic@iee.org

red vožnje uzimajući u obzir složenu dinamičku interakciju među događajima, odabranu funkciju cilja i procenu budućeg stanja u sistemu. Ovaj tip zadatka je poznat pod nazivima: preraspoređivanje trasa vozova, preraspoređivanje vozova (engl. *train rescheduling*), preraspoređivanje reda vožnje (engl. *timetable rescheduling*) i vrši se na manjem fragmentu železničke mreže, u kraćem periodu planiranja, kao odgovor na nastale poremećaje.

U prošlosti, iskusni dispečeri su rešavali ovaj zadatak ad-hoc, koristeći jednostavna pravila otpreme (engl. *dispatching rules*) i trenutno dostupne informacije. Ovakav pristup svakako nije zadovoljavajući jer se problem preraspoređivanja tretira lokalno. Neki od prvih softvera za preraspoređivanje trasa vozova samo su proveravali da li je rešenje koje je predložio korisnik-dispečer izvodljivo, a nisu išli na kompletnu regeneraciju rasporeda [2].

U današnje vreme softverski sistemi i računari ogromne procesne snage sposobni su da do oporavljenog reda vožnje dođu u realnom vremenu. U ovom radu će biti prezentiran upravo jedan takav softverski sistem.

Ostatak rada organizovan je na sledeći način: u sekciji 2 dat je kratak pregled relevantne literature. U sekciji 3 ukratko je prikazan predloženi model i njemu odgovarajući softver za oporavak reda vožnje. U cilju validacije modela i softvera sprovedeno je više tipova eksperimenata i oni su opisani u sekciji 4, dok je u poslednjoj sekciji dat zaključak i pravci daljeg istraživanja.

2. PREGLED LITERATURE

Planiranje železničkih redova vožnje (engl. *train timetabling planning*) je problem koji je dosta razmatran u prisutnoj literaturi. Na ovom mestu spomenućemo pregledne radove [3], [4] i [5]. U radu [3] dat je obiman pregled modela i metoda, pri čemu se razlikuje standardna i robusna – otporna na otkaze (engl. *fault-tolerant*) verzija problema. Standardni problem ima dve glavne varijante: periodičnu (cikličnu, red vožnje se ponavlja u zadatom vremenskom periodu, npr. svakog sata, svakog dana) i neperiodičnu (necikličnu). Putnički saobraćaj se najčešće obavlja po periodičnom redu vožnje [4]. U radu [5] dat je sveobuhvatan pregled metoda i modela alokacije elemenata železničke mreže na strategijskom, taktičkom i operativnom nivou. Osim problema reda vožnje, rad razmatra i probleme rutiranja (engl. *routing*), otpreme (engl. *dispatching*) i ulaska vozova na stanične perone (engl. *platforming*). U radu [6] prezentiran je periodični red vožnje implementiran za Berlinski metro koji koristi formulaciju celobrojnog programiranja za rešavanje problema periodičnog raspoređivanja događaja.

Veliki broj novijih radova razmatra problem preraspoređivanja u realnom vremenu u železničkom saobraćaju. Na početku, spomenućemo vrlo obiman, skorašnji pregledni rad [7] o modelima i algoritmima železničkog preraspoređivanja. Autori daju pregled velikog broja radova koji diskutuju tri tipa preraspoređivanja: reda vožnje, voznih sredstava i lokomotivskog osoblja. Za naše istraživanje posebno su interesantni radovi koji se bave preraspoređivanjem reda vožnje. Autori inicijalno ove radove klasifikuju prema tome da li rešavaju problem poremećaja (manjih smetnji u odvijanju saobraćaja) ili prekida (većih incidenata koji dovode do otkazivanja određenog broja vozova koji su planirani redom vožnje). U skladu sa ovom klasifikacijom, naše istraživanje rešava problem poremećaja. Naše preraspoređivanje je zapravo odlaganje vremena prispeća i otpravljanja za neke od vozova, što za posledicu može imati promenu prvobitno planiranih preticajnih i stanica ukrštavanja. Druga podela koju prezentiraju autori ovog rada tiče se nivoa detaljnosti pri posmatranju železničkog sistema. Makroskopski nivo posmatra železničku mrežu na višem nivou; uređaji kao sastavni delovi pruga i stanica i signali ne uzimaju se u razmatranje. Mikroskopski pristup, kakav je prisutan i u našem istraživanju, uzima u obzir stvarne signale koji ograničavaju uređaje. Istraživanja mogu biti orijentisana na vozove (zakasnele, otkazane), što je slučaj i u ovom radu, ili na putnike ili robu.

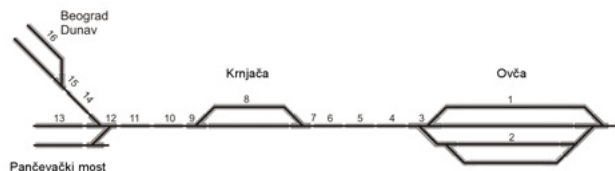
3. MODEL I SOFTVER

3.1 Model mreže

Elementi železničke mreže su sastavni delovi pruga i stanica: uređaji ili resursi. Prema osobinama koje se tiču mogućeg broja istovremeno prisutnih vozova na uređaju, broja ulaznih i izlaznih tačaka uređaja i mogućnosti međusobnog povezivanja, razlikujemo tri tipa uređaja: prostorne odseke, ulazno-izlazne uređaje i stanične koloseke. U jednom momentu samo jedan voz može zauzimati prostorni odsek ili ulazno-izlazni uređaj, dok je broj vozova na staničnim kolosecima određen kapacitetom stanice. Međustanično rastojanje podeljeno je na više prostornih odseka i ulazno-izlaznih uređaja ograničenih signalima, tako da više vozova koji se kreću u istom smeru može istovremeno biti prisutno na njemu. Na međustaničnom rastojanju mogu postojati rasputnice. Primer železničke mreže (deo Beogradskog železničkog čvora – BŽČ) prikazan je na slici 1. Prostorni odseci su resursi numerisani sa: 4, 5, 6, 10, 11 i 14, ulazno-izlaznih uređaji su numerisani 3, 7, 9, 12 i 15 (uređaj 12 je Rasputnica „Pančevački most”), a stanični koloseci sa 1, 2, 8, 13 i 16.

Ovakav realističan model železničke mreže, koji uzima u obzir stvarne signale koji ograničavaju resurse, daje

mogućnost definisanja realne, prostorne distance između vozova koji se slede, a ne aproksimativne vremenske, što je slučaj u nekim radovima.



Slika 1. Model dela BŽČ

3.2. Model kretanja vozova

Realni put vožnje je niz svih stanica preko kojih voz mora da prođe od izvorišta do odredišta. U ovom radu se pojam puta vožnje posmatra u nešto modifikovanom smislu. Put vožnje je niz uređaja preko kojih voz mora da prođe na putu od izvorišta do odredišta. Umesto vremena prispeća i otpravljanja za svaki voz i svaki uređaj u njegovom putu vožnje, smatraćemo da nam je poznato idealno trajanje zauzimanja svakog uređaja vozom u njegovom putu vožnje. To zauzimanje obuhvata kako kretanje tako i eventualno planirano bavljenje (stajanje). Ako nam je poznato planirano vreme prispeća voza na prvi uređaj u putu vožnje, planirano generisanje voza, na osnovu idealnog trajanja zauzimanja možemo smatrati da nam je poznat i idealni red vožnje voza. Trenutak (stvarnog) generisanja voza može da bude veći od planiranog; tada kažemo da voz ima upadno kašnjenje. Vožnja voza je niz partikularnih vožnji – operacija zauzimanja uređaja koji se nalaze u putu vožnje voza. Voz se kreće u neparnom smeru ako redni brojevi uređaja u njegovoj ruti rastu; u suprotnom, kreće se u parnom smeru. Dakle, svakom vozu se na jedinstven način pridružuje vožnja.

Kretanje vozova na železničkoj mreži često je u literaturi modelirano kao job shop problem raspoređivanja: vožnje vozova su poslovi koji se raspoređuju na elemente infrastrukture – resurse [8]. Ovako uspostavljena korespondencija daje nam pravo da pojmove „voz“, „vožnja“ i „posao“ posmatramo kao sinonime u ovom radu. Međutim, autori uglavnom imaju pristup koji se donekle razlikuje od našeg. Tako, u [8] stanice se modeliraju kao uređaji beskonačnog kapaciteta što se značajno razlikuje od našeg realističnog pristupa. Rad [9] modelira kretanje vozova kroz metro stanice kao job shop problem raspoređivanja bez čekanja (engl. *no-wait job-shop scheduling problem*). Ovaj model je za nas neprihvatljiv jer zabranjuje čekanje na uređajima, tj. u našem slučaju produženo bavljenje vozova u stanicama. Dopušteno produženo bavljenje i neplanirano zaustavljanje u stanicama neophodno je u uslovima preraspoređivanja kada se stanice preticanja i ukrštavanja određuju dinamički. U našem modelu vozovi

se slede na tzv. blokovskom razmaku, tj. između svaka dva voza koji se slede na međustaničnom rastojanju nalazi se bar jedan prostorni odsek i iza njega još jedan uređaj u smeru kretanja tih vozova. U našem istraživanju put vožnje, ruta, je fiksna nasuprot istraživanju opisanom u [10] gde su rute promenljive.

Konflikti između vozova nastaju kada broj vozova koji istovremeno treba da koriste neki resurs nadmašuje njegov kapacitet ili kada su narušena neka od nametnutih ograničenja koja se tiču regulisanja kretanja vozova. U opštem slučaju, rešavanje konflikata zahteva unošenje odlaganja u bar jednu od konfliktnih vožnji.

3.3. Ograničenja

Problemi raspoređivanja i preraspoređivanja trasa vozova zapravo su optimizacioni problemi zadovoljenja ograničenja (engl. *constraint satisfaction optimization problem* – CSO problem): cilj je da se pronađe rešenje koje zadovoljava sva postavljena ograničenja i optimizira odabranu funkciju cilja. Stoga je sledeći korak u našem istraživanju bilo definisanje ograničenja.

U našem modelu razlikujemo nekoliko klasa ograničenja:

1. **konjunktivna ograničenja** – vozovi zauzimaju resurse unapred poznatim redosledom, predviđenim njihovim putem vožnje;
2. **disjunktivna ograničenja** – broj vozova trenutno prisutnih na nekom resursu ograničen je njegovim kapacitetom;
3. **bezbednosna ograničenja** – sve poznate regulative koje važe za kretanje vozova u realnom železničkom sistemu. U našem modelu to su: Pravilo o brzinama, Pravilo zaustavljanja, Pravilo o zauzimanju i oslobađanju unarnih resursa, Pravilo o zauzimanju i oslobađanju staničnih koloseka, Pravilo sleđenja, Pravilo ukrštavanja, Pravilo bavljenja u stanicama i Pravilo nejedновременog dolaska u stanicu;
4. **ograničenja preraspoređivanja** – Pravilo o ulasku u sistem bez čekanja zabranjuje „nagomilavanje“ vozova na granicama sistema posmatranja. U preraspoređivanju, posmatrana železnička mreža je samo mali fragment realne mreže i početne i krajnje stanice modela, u najvećem broju slučajeva, samo su prolazne stanice u realnom sistemu;
5. **specijalna ograničenja** – pružaju mogućnost planiranja vrlo specifičnih saobraćajnih situacija. Mogućnosti definisanja ovakvih dodatnih ograničenja su neiscrpne i zavise od zahteva postavljenih pred sistem raspoređivanja. Npr. jedno od takvih ograničenja je Pravilo istovremenog boravka u

stanici koje obezbeđuje da dva voza istovremeno borave u nekoj stanici određeni vremenski period (npr. zbog presedanja putnika).

Sva nabrojana ograničenja precizno su formulisana u našem radu [11] u matematičkoj notaciji koja omogućava jednostavno preslikavanje u optimizacioni programski jezik u fazi implementacije.

Rešenje našeg CSO problema je niz početnih trenutaka zauzimanja svakog uređaja koji se nalazi u putu vožnje voza, za svaki od posmatranih vozova. Dakle, početni trenuci zauzimanja uređaja su naše promenljive odlučivanja.

3.4. Optimizacioni kriterijumi

U slučaju oporavka reda vožnje podesni optimizacioni kriterijumi (ciljne funkcije) su svakako oni koji uzimaju u obzir kašnjenja i utvrđene prioritete (ponderi) različitih kategorija vozova. U našem dosadašnjem istraživanju posmatrana je minimizacija po sledećih sedam kriterijuma: maksimalno kašnjenje, maksimalno ponderisano kašnjenje, ukupno kašnjenje, ukupno ponderisano kašnjenje, maksimalan zastoje, broj vozova sa kašnjenjem i *makespan* (maksimum završnih trenutaka svih poslova).

U ovom radu za nas su interesantni ponderisani kriterijumi. Odlučivanje dispečera, koliko god je *ad hoc*, u uslovima mešovitog saobraćaja ipak je i ponderisano: pri rešavanju konflikta on prednost daje "važnijem" vozu, onom kome je dodeljen veći ponder.

3.5. Heuristike za ubrzanje

Grčki glagol „*heuriskein*“ znači „otkriti“. Heuristika označava znanje o otkrivanju i pronalaženju tehnika za rešavanje problema, s tim što za takav proces rešavanja problema obično nema strogih garancija da će biti uspešan. Cilj heuristika pri rešavanju optimizacionih problema je da se brzo dođe do rešenja koje je dovoljno dobro za problem koji se rešava. Constraint programming softverski alati obavljaju sistematsko pretraživanje i kao takvi vremenski su zahtevni, ali su sposobni da nađu optimalna rešenja saglasno zadatoj funkciji cilja. Zbog vremenske performanse, oni po pravilu nisu podesni za zadatke preraspoređivanja. Međutim, mi smo, bazirajući se na poznavanju realnog problema, formulisali heurističke algoritme koje treba da „ubrzaju“ raspoloživi Constraint programming alat.

Algoritmi izdvajanja izdvajaju minimalne skupove operacija koje jedna na drugu utiču, i kao takve, moraju se raspoređivati zajedno. Algoritmi ograničavanja treba da ograniče domene promenljivih odlučivanja, a

algoritmi pretraživanja usmeravaju potragu za rešenjima u delove prostora pretraživanja, gde, na osnovu ispunjenja nekih uslova, verujemo da se nalaze „dobra“ dopustiva rešenja. Ovakav pristup je aproksimativan, problem se rešava „deo po deo“, da bi se ostvarila zadovoljavajuća vremenska performansa u problemu preraspoređivanja. Stoga ne postoji nikakva garancija u pogledu kvaliteta, a pogotovo optimalnosti, nađenog rešenja.

Kompletniji opis inicijalno korišćenih heuristika za naš problem preraspoređivanja trasa vozova može se naći u radu [12], mada su ovi algoritmi u više iteracija unapređivani i posle publikovanja referenciranog rada.

3.6. Implementacija softvera

U cilju eksperimentalne verifikacije predloženog pristupa, projektovan je i implementiran odgovarajući softverski sistem. Windows aplikacija, implementirana u Visual Basic-u, komunicira sa SQL Server bazom podataka koja sadrži podatke o početnom redu vožnje i železničkoj mreži, kao i ažurne dinamičke podatke o realizaciji aktuelnog reda vožnje. Zamišljeno je da u realnim uslovima dinamički podaci pristižu od sistema za monitoring realizacije reda vožnje. Za potrebe testiranja, razvijen je poseban softverski modul koji generiše realno moguće dinamičke podatke i šalje ih u SQL Server bazu podataka.

Sam optimizacioni model, koji se sastoji od definisanja ulaznih podataka, promenljivih odlučivanja, ciljne funkcije, ograničenja, koda heuristika i lokacije eksportovanja rezultata, iskodiran je u OPL-u (*Optimization Programming Language*). OPL je baziran na deklarativnoj programskoj paradigmi, što omogućava lako kodiranje kompleksnih ograničenja koja se javljaju u našem problemu. Primera radi, ograničenja su iskodirana u oko 400 linija OPL koda, a u radu [13] opisan je softver u kome su vrlo slična ograničenja iskodirana sa oko 3400 linija TURBO Pascal koda! Constraint programming je vrlo rasprostranjena tehnologija za rešavanje optimizacionih problema uopšte, pa i za probleme raspoređivanja u železničkom saobraćaju [2, 8, 10, 14], zahvaljujući pre svega prisustvu komercijalnih Constraint programming alata koji programersku produktivnost značajno povećavaju. I naš model je rešen korišćenjem Constraint Programming solvera CP Optimizer-a, koji je deo integrisanog razvojnog okruženja ILOG CPLEX Optimization Studio Community Edition V12.6.3 for Windows x86-64 Multilingual (probna verzija dostupna na: <https://www.ibm.com/developerworks/downloads/ws/ilogplex>).

Nađeni rezultat, oporavljeni red vožnje u tabelarnom obliku, eksportovan je u Excel radni list i automatski

vizualizovan u formi modifikovanog Gantt-ovog dijagrama kakav se može videti na slikama 2–7. Ovakva vizualizacija reda vožnje uobičajena je i prepoznatljiva u železničkom saobraćaju i poznata je pod nazivom „grafikon reda vožnje”.

4. ANALIZA REZULTATA

Eksperimenti su sprovedeni na realnom fragmentu železničke mreže (deo Beogradskog železničkog čvora, jednokolosečna pruga na relaciji Beograd Centar – Pančevo) sa realnim kategorijama vozova koji tu saobraćaju: međunarodni daljinski vozovi – kategorija 1, prigradski vozovi – kategorija 3, gradski vozovi (vozovi sistema „BEOVOZ”) – kategorija 4 i teretni vozovi – kategorija 5. Kategorijama vozova su pridruženi ekspertske ocenjeni ponderi 4, 2, 2 i 1, respektivno, uz uvažavanje činjenica da se raspoređivanje obavlja u periodu koji ne obuhvata vršni čas, da se obavlja van reona gde daljinski vozovi završavaju svoje kretanje i da nema posebnih kategorija teretnih vozova.

Izabrana železnička mreža bila je za nas posebno interesantna tokom proteklih godina iz više razloga:

- Raspoređivanje vozova na jednokolosečnoj pruži je posebno složen problem jer pored sleđenja i preticanja vozova koji se kreću u istom smeru mora da reši i problem ukrštavanja vozova koji se kreću u suprotnim smerovima.
- Posmatrani fragment mreže karakteriše visok stepen mešovitosti. Na njoj saobraćaja više kategorija putničkih vozova, kao i teretni vozovi. Struktura vozova je vrlo promenljiva u toku dana.
- Na ovom delu Beogradskog železničkog čvora je i Rasputnica „Pančevački most” od koje se odvajaju, odnosno spajaju tri pruge: 2 jednokolosečne i jedna dvokolosečna. Ova rasputnica može se svrstati u složene dvokolosečne rasputnice sa kosim ukrštajem.
- Na ovom delu Beogradskog železničkog čvora primenjuju se različiti tehnički sistemi regulisanja saobraćaja vozova.
- Na kraju, mada svakako ne i najmanje važno: raspoređivanje vozova na jednokolosečnoj mreži je predmet interesovanja za neke od autora ovog rada već duži niz godina [13, 15].

Napomenimo da je ovaj deo Beogradskog železničkog čvora u rekonstrukciji od 2014. godine. To svakako ne umanjuje značaj našeg istraživanja jer će svakako i u budućnosti postojati pruge ili delovi pruga na kojima će se odvijati jednokolosečni saobraćaj.

Tokom validacije modela i softvera sprovedeno je više tipova eksperimenata.

Cilj prve grupe eksperimenata je bio ocena korektnosti i efikasnosti. Eksperimenti su pokazali da u većini slučajeva (oko 90%), vremenska performansa zadovoljava potrebe operativnog železničkog upravljanja, tj. dopustivo rešenje biva pronađeno unutar zadatog vremenskog intervala od 30 sekundi, što znači da je realizovani softverski sistem efikasan. Softver je i korektan: ni jedan od generisanih rasporeda nije bio nedopustiv.

Već je bilo reči da naš pristup generisanju oporavljenog reda vožnje nije egzaktan već aproksimativan. Dakle, o njegovom kvalitetu ne možemo suditi na osnovu njega samog, već poredeći ga sa nekim drugim rešenjima za iste konfliktne situacije. Stoga su se sledeći eksperimenti sastojali u poređenju oporavljenih rasporeda koji su generisali iskusni dispečeri sa onima koje je generisao softver za posmatranu železničku mrežu.

Posmatrani su realizovani grafikoni saobraćaja vozova tokom 35 radnih dana u drugom kvartalu 2010. godine. Eksperimentom je bilo obuhvaćeno više od 100 „saobraćajnih situacija”. „Saobraćajna situacija” predstavlja realizaciju trasa kretanja skupa od n vozova u određenom vremenskom periodu koja nema uticaja na neki drugi skup vozova. Pored toga, bar jedan od n posmatranih vozova, učesnik u „saobraćajnoj situaciji”, ulazi u posmatrani sistem (generisan je) sa određenim kašnjenjem u odnosu na postojeći red vožnje. To potencijalno može da dovede do konfliktne situacije pa je neophodna intervencija dispečera koja dovodi do promene trase kretanja voza u odnosu na trasu planiranu redom vožnje. Dakle, realizovani grafikon saobraćaja vozova u svakoj „saobraćajnoj situaciji” posledica je intervencija i odluka dispečera. Iste saobraćajne situacije rešavao je i implementirani softver, za izabrani optimizacioni kriterijum minimizacija maksimalnog ponderisanog kašnjenja. Ponderisano kašnjenje svakog pojedinačnog voza je njegovo stvarno kašnjenje pomnoženo ponderom koji je pridružen njegovoj kategoriji. Izbor ovog kriterijuma baziran je na pretpostavci da dispečer daje prednost „važnijem” vozu, tj. onom sa većim ponderom. Zaista, dispečeri uobičajeno odlučuju saglasno FCFS (First Come First Serve) pravilu otpreme – resurs dobija voz koji ga je ranije zatražio. U slučaju da više vozova istovremeno traži isti resurs, prednost se daje vozu višeg prioriteta.

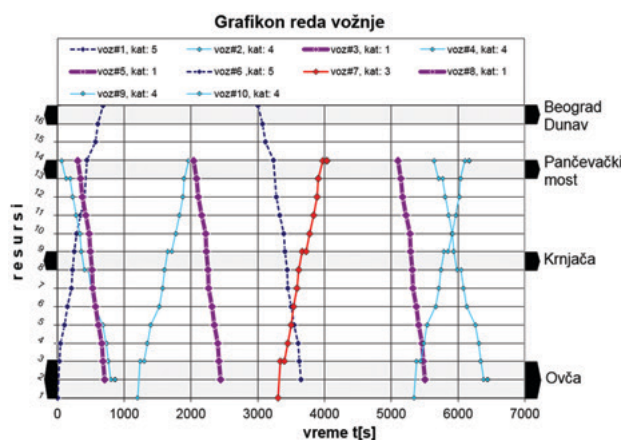
Iz skupa spomenutih saobraćajnih situacija za potrebe ilustracije u ovom radu izdvojene su dve.

Primer 1: Posmatrajmo red vožnje dat u tabeli 1. Bez dublje analize o tome koja su sve ograničenja narušena, na prvi pogled vidljivo je višestruko narušavanje disjunktivnih ograničenja (više vozova treba da bude istovremeno prisutno na unarnim resursima!), slika 2.

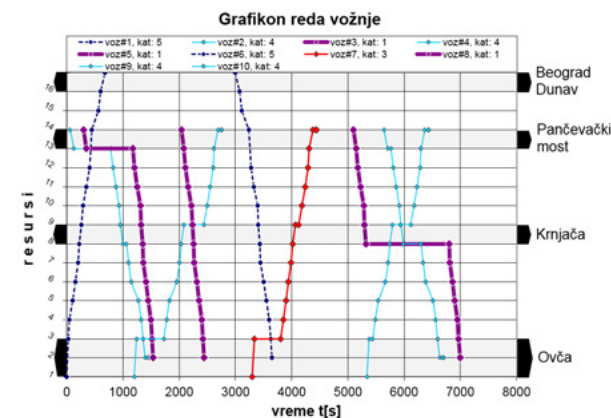
Rešenje dispečera prikazano je na slici 3, a rešenje koji je našao softver za optimizacioni kriterijum minimizacija maksimalnog ponderisanog kašnjenja na slici 4.

Tabela 1. Problem reda vožnje br. 1 za železničku mrežu sa slike 1.

Posao vožnja ≡ voz	Redosled resursa ≡ put vožnje	Trenutak generisanja	Vremena procesiranja operacija	Kategorija	Ponder
#1	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16	0	28, 21, 56, 46, 54, 21, 30, 29, 63, 57, 36, 125, 38, 75	5	1
#2	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	60	129, 40, 50, 56, 22, 108, 39, 47, 130, 50, 31, 100	4	2
#3	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	300	45, 28, 50, 56, 13, 26, 9, 47, 40, 50, 18, 24	1	4
#4	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1200	100, 48, 50, 130, 47, 29, 108, 59, 56, 50, 18, 129	4	2
#5	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	2040	45, 28, 50, 56, 13, 26, 9, 47, 40, 50, 18, 24	1	4
#6	16, 15, 14, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	3000	75, 38, 125, 36, 57, 63, 14, 30, 10, 54, 45, 56, 21, 28	5	1
#7	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	3300	100, 48, 50, 40, 47, 29, 108, 59, 56, 50, 18, 129	3	2
#8	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	5100	45, 28, 50, 56, 13, 26, 9, 47, 40, 50, 18, 24	1	4
#9	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	5340	100, 48, 50, 130, 47, 29, 108, 59, 56, 50, 18, 129	4	2
#10	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	5640	129, 40, 50, 56, 22, 108, 39, 47, 130, 50, 31, 100	4	2



Slika 2. Red vožnje br. 1 sa disjunktivnim konfliktima

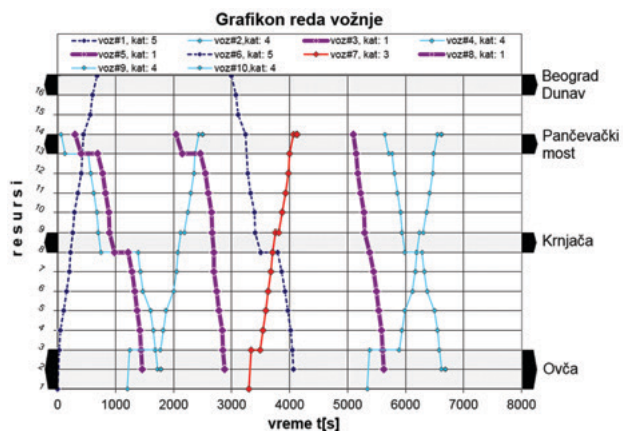


Slika 3. Oporavljeni red vožnje sa slike 2 – dispečersko rešenje

Primer 2: Posmatrajmo red vožnje dat u tabeli 2. I u njemu je prisutno više disjunktivnih konflikata, slika 5.

Rešenje dispečera prikazano je na slici 6, a rešenje koje je našao softver za optimizacioni kriterijum minimizacija maksimalnog ponderisanog kašnjenja na slici 7.

Pregled parametara dispečerskih i softverskih rešenja za oba primera dat je u tabeli 3. Jedini kriterijum po kome je dispečersko rešenje u oba primera u prednosti nad softverskim je manji broj vozova sa kašnjenjem. Međutim, ako bi ove saobraćajne situacije rešili



Slika 4. Oporavljeni red vožnje sa slike 2 – softversko rešenje

optimizacionim modelom kome je ciljna funkcija minimizacija broja vozova sa kašnjenjem, za primer 1 broj vozova sa kašnjenjem bi bio smanjen na 7, a za primer 2 čak na 4. Dakle, softversko rešenje značajno zavisi od odabranog optimizacionog kriterijuma što je moglo i da se očekuje.

Sumarnim posmatranjem došlo se do sledećih zaključaka:

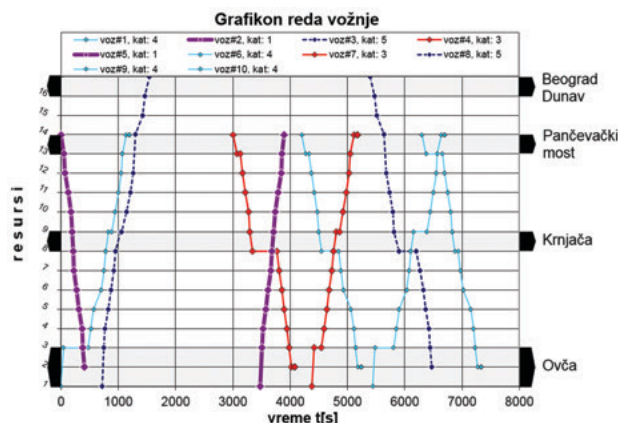
- softver je postigao smanjenje maksimalnog ponderisanog kašnjenja u proseku za oko 40%;
- softver je predložio bolja rešenja od rešenja koja je implementirao dispečer u oko 80% slučajeva, dok su u oko 15% slučajeva i softver i dispečer pronašli ista rešenja;
- u oko 3% slučajeva, rešenja dispečera bila su neznatno bolja (za manje od 60 s). Razlog može biti u tome što se vremena prispeća vozova u kontrolne tačke beleže u dispečerskim knjigama i grafikonima saobraćaja vozova zaokružena na 0,5 min, pa je akumulacija grešaka zaokruživanja dovela do ovakvog rezultata;
- u oko 2% slučajeva softver nije uspeo da ponudi dopustiv raspored. Naknadnom analizom je ustanovljeno da su to bili slučajevi poremećaja koji su rešeni otkazivanjem vozova, za šta softver nema kompetenciju.

Na kraju, interesovalo nas je mišljenje dispečera kao potencijalnih korisnika softvera. Dispečeri su visoko ocenili osobinu softvera da za isti poremećaj mogu dobiti više potencijalno različitih oporavljenih redova vožnje. Što se tiče mogućnosti potpunog oslanjanja na rešenja koja je ponudio softver, može se zaključiti da oni ipak najveće poverenje imaju u sopstvenu obučenost i iskustvo. Međutim, čak i ako ne želi da se potpuno osloni na ponuđena softverska rešenja, iskusni dispečer ima vremena da „baci pogled“ na jedno ili više njih i donese najbolju odluku u datoj saobraćajnoj situaciji (vršni čas, radni/neradni dan, specijalni zahtevi).

Dakle, svi tipovi eksperimenata potvrdili su sposobnost modela i softvera da pruže podršku operativnom železničkom upravljanju.

Tabela 2. Problem reda vožnje br. 2 za železničku mrežu sa slike 1.

Posao ≡ voznja ≡ voz	Redosled resursa ≡ put vožnje	Trenutak generisanja	Vremena procesiranja operacija	Kategorija	Ponder
#1	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	0	100, 48, 50, 130, 47, 29, 108, 59, 56, 50, 18, 129	4	2
#2	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	0	45, 28, 50, 56, 13, 26, 9, 47, 40, 50, 18, 24	1	4
#3	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16	720	28, 21, 56, 46, 54, 21, 30, 29, 63, 57, 36, 125, 38, 75	5	1
#4	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	3000	129, 40, 50, 56, 22, 108, 39, 47, 40, 50, 31, 100	3	2
#5	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	3480	24, 18, 50, 40, 47, 21, 26, 29, 56, 50, 12, 45	1	4
#6	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	4200	129, 40, 50, 56, 22, 108, 39, 47, 130, 50, 31, 100	4	2
#7	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	4380	100, 48, 50, 40, 47, 29, 108, 59, 56, 50, 18, 129	3	2
#8	16, 15, 14, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	5400	75, 38, 125, 36, 57, 63, 14, 30, 10, 54, 45, 56, 21, 28	5	1
#9	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	5440	100, 48, 50, 130, 47, 29, 108, 59, 56, 50, 18, 129	4	2
#10	13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2	6300	129, 40, 50, 56, 22, 108, 39, 47, 130, 50, 31, 100	4	2



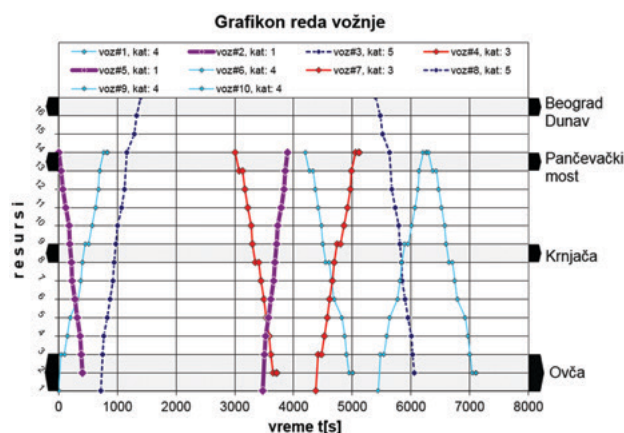
Slika 7. Oporavljeni red vožnje sa slike 5 – softversko rešenje

5. ZAKLJUČAK

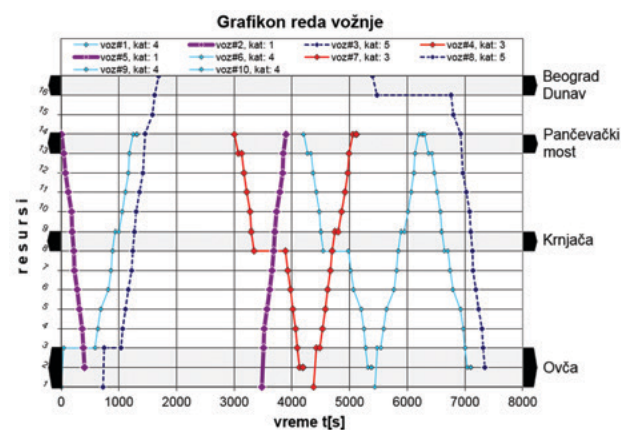
U radu je predstavljen softver koji rešava konflikte u železničkom redu vožnje preraspoređivanjem trasa vozova. Testiranja su potvrdila da je softver primenljiv u operativnom železničkom upravljanju zbog: zadovoljavajuće vremenske performanse, kvaliteta nađenog rešenja i visoke pozitivne ocene od strane potencijalnih korisnika – dispečera.

Rešavanje problema preraspoređivanja trasa vozova pruža širok prostor za više tipova istraživanja u budućnosti:

- razvoj tehnika za prepoznavanje poremećaja u realnom vremenu. Savremene informaciono-komunikacione tehnologije i inteligentni uređaji mogu obezbediti neprekidan priliv podataka o lokaciji vozova što praktično znači da softver za oporavak rasporeda može biti pokrenut u trenutku nastanka poremećaja;
- razvoj efikasnih algoritama za optimizaciju, koje će, dopunjeni ogromnom procesnom snagom savremenih računara, biti sposobni da daju optimalan ili bar „dovoljno dobar“ oporavljeni raspored u limitiranom vremenskom intervalu;
- razmatranje i drugih ciljnih funkcija, npr. minimizacija odstupanja od inicijalnog rasporeda, minimizacija kašnjenja putnika, minimizacija broja ili troškova neplaniranog zaustavljanja vozova, itd.; razvoj softverskih sistema sa dispečer-friendly korisničkim interfejsom. Bez odličnog korisničkog interfejsa, čak i fantastični rezultati algoritama raspoređivanja neće naći svoje mesto u praksi, posebno ako se radi o sistemu koji treba da radi u realnom vremenu. Poželjna osobina korisničkih interfejsa je omogućavanje dispečeru-korisniku da interaktivno edituje raspored (grafikon reda vožnje) generisan od strane softvera, uzimajući u obzir njegovo iskustvo i, eventualno, informacije koje generator



Slika 5. Red vožnje br. 2 sa disjunktivnim konfliktima



Slika 6. Oporavljeni red vožnje sa slike 5 – dispečersko rešenje

Tabela 3. Pregled parametara dispečerskih i softverskih rešenja za primere 1 i 2

		maksimalno kašnjenje	maksimalno ponderisano kašnjenje	ukupno kašnjenje	ukupno ponderisano kašnjenje	maksimalni zastoj	makespan	broj vozova sa kašnjenjem
primer 1	dispečersko rešenje	1488	5952	4561	13760	1428	6994	7
	softversko rešenje	920	3024	3901	9999	578	6681	9
primer 2	dispečersko rešenje	1290	1290	2926	4270	1290	7342	5
	softversko rešenje	432	864	2254	3950	372	7330	8

rasporeda nije imao na raspolaganju. Kada planer edituje raspored, poželjno je da je u mogućnosti da prati uticaj svojih promena na različite mere performanse, da upoređuje različite rasporede i obavlja analize tipa „šta – ako“. Idealno bi bilo da koristeći tehniku „odvuci i spusti“ („*drag&drop*“) uz pomoć miša, korisnik ima mogućnost da „pomera“ voz od jednog do drugog položaja. Obezbeđenje interfejsa sa sposobnošću klika i povlačenja nije jednostavan zadatak. „Menjanje“ položaja određenog voza, u stvari je menjanje početaka procesiranja za njegove operacije, a možda i redosleda kojim vozovi zauzimaju resurse. Sve to, naravno, može da dovede do konfliktnog reda vožnje. „*Drag&drop*“ tehnika nužno zahteva da softver ima funkcionalnost da proveriti da li je rešenje koje predlaže korisnik-dispečer izvodljivo.

ZAHVALNICA

Ovaj rad delimično je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta pod brojem 036012.

LITERATURA

- [1] Cai, X., Goh, C.J.: *A fast heuristic for the train scheduling problem*, Computers and Operations Research, Vol. 21, Issue 5, pp. 499-510, 1994.
- [2] Chiu, K., Chou, C. M., Lee, J. H. M., Leung, H. F., Leung, Y. W.: *A constraint-based interactive train rescheduling tool*, Constraints, Vol. 7, Issue 2, pp. 167 – 198, 2002.
- [3] Cacchiani, V. and Toth, P.: *Nominal and robust train timetabling problems*, European Journal of Operational Research, Vol. 219, Issue 3, pp. 727 – 737, 2012.
- [4] Caprara, A., Kroon, L. G. and Toth, P.: *Optimization Problems in Passenger Railway Systems*, Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, Vol. 6, pp. 3896 – 3905, 2011.
- [5] Lusby, R., Larsen, J., Ehrgott, M., Ryan D.: *Railway track allocation: models and methods*, OR Spectrum, Vol. 33, Issue 4, pp. 843 – 883, 2011.
- [6] Liebchen, C.: *The First Optimized Railway Timetable in Practice*, Transportation Science, Vol. 42, Issue 4, pp. 420 – 435, 2008.
- [7] Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L.G., Toth, P., Veenturf, L.P., Wagenaar, J.C.: *An Overview of Recovery Models and Algorithms for Real-time Railway Rescheduling*, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 63, pp. 15–37, 2014.
- [8] Oliveira, E., Smith B.M.: *A hybrid constraint-based method for single-track railway scheduling problem*, Rep 2001.04. School of Computing, University of Leeds, (12. 1. 2016.) dostupno na: https://www.engineering.leeds.ac.uk/computing/research/publications/reports/2001/2001_04.pdf, 2001.
- [9] Mannino, C., Mascis, A., *Optimal real-time traffic control in metro stations*, Operation Research, Vol. 57, Issue 4, pp. 1026 – 1039, 2009.
- [10] Rodriguez, J.: *A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions*, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 41, Issue 2, pp. 231 – 245, 2007.
- [11] Mladenović, S., Vesković, S., Branović, I., Janković, S., Aćimović, S.: *Heuristic Based Real - Time Train Rescheduling System*, Networks, Vol. 67, Issue 1, 2016, pp. 32-48, 2016.
- [12] Mladenović, S., Čangalović, M.: *Heuristic approach to train rescheduling*, Yugoslav Journal of Operations Research, Vol. 17, No. 1, pp. 9-29, 2007.
- [13] Mladenović, S., Vesković, S., Čičak, M.: *SIZES programski sistem za utvrđivanje kapaciteta jednokolosečne pruge*, XLIV Konferencija za ETRAN, Bukovička Banja, Zbornik radova, Sveska III, str. 63-66, 2001.
- [14] Mladenović, S., M. Čangalović, D. Bečejski–Vujaklija, Marković, M.: *Constraint programming approach to train scheduling on railway network supported by heuristics*, 10th World Conference on Transport Research, CD of Selected and Revised Papers, Paper number 807, Abstract book I, pp. 642-643, Istanbul, Turkey, 2004.
- [15] Čičak, M., Vesković, S., Mladenović, S.: *Modeli za utvrđivanje kapaciteta železnice*, Saobraćajni fakultet i Želnid, Beograd, 2002.