

MIKROSIMULACIONI MODELI U ŽELJEZNIČKOM SAOBRAĆAJU MICROSIMULATION MODELS IN RAILWAY TRAFFIC

UDK: 656.2+656.33.01:517.876.5

REZIME:

Upotreba mikrosimulacija u željezničkom saobraćaju već neko vrijeme predstavlja osnovni korak pri razmatranju kapaciteta, uvidu u infrastrukturne projekte i pri analizi voznih sredstava i infrastrukture. Mikrosimulacioni modeli se zasnivaju na modeliranju interakcije infrastrukture i vozila, a u skladu sa pretpostavljenim planom saobraćaja (npr. redom vožnje ili planom manevre). RailSys omogućava realistično modeliranje sistema saobraćaja vozova i na taj način pomaže pri donošenju odluka na operativnom ili nekom drugom nivou odlučivanja. OpenTrack je program za simulaciju saobraćaja: vozova velike brzine, putničkih i teretnih vozova, planinske željeznice, lakih šinskih sistema i sl. Odlikuje se velikom preciznošću i služi kao pomoć pri planiranju i praćenju saobraćaja. Trenissimo, deo paketa TRENOLab, koristi se za simulaciju saobraćaja, ali uz to omogućava modeliranje ponašanja mašinovođe i dispečera. Mikrosimulacije ulaze u srž saobraćajnih procesa i inženjerima daju podatke koji su lako upotrebljivi i pogodni za dalju analizu, pomoć u donošenju odluka ili optimizaciju sistema.

Ključne reči: mikrosimulacije, željeznički saobraćaj, modeliranje saobraćaja

SUMMARY:

The use of microsimulations in railway traffic has been a basic step for some time: considering capacity, creating a better insight into infrastructure projects and in order to reduce costs during the reconstruction or construction of the railway. All microsimulation models work on the principle of improving infrastructure, rolling stock capacity and operations performed on the railway network. RailSys shows a realistic state of the system and thus helps to create the right decisions whose impact is reflected in the entire railway network. OpenTrack is a simulation program developed within the research project of the Swiss Institute of Technology used in the field of: high-speed trains, passenger and freight trains, mountain railways, light rail systems, etc. It is also characterized by high precision and serves as an aid in traffic planning and monitoring. Trenissimo as a part of the company's TRENOLab package provides assistance through micro-approach and individual train simulations. This simulation program is specific in that it takes into consideration the behavior of the driver and dispatcher. Microsimulations come to the core of traffic processes and provide engineers with data that is easy to use and suitable for perceiving the situation completely.

Key words: microsimulations, railway traffic, traffic modelling

* Milica Laketić, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305, milica.laketic@yahoo.com

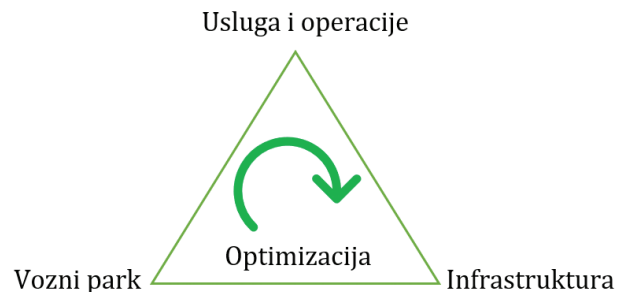
** Prof. dr Sanjin Milinković, Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305, s.milinkovic@sf.bg.ac.rs

1. UVOD

Saobraćaj, jedan od ključnih delova privrede i ekonomije jedne zemlje, često je podložan svakodnevnim promjenama i spoljnim uticajima. Prvenstveno, mora da zadovolji zahtjeve korisnika prevoza, bilo da je u pitanju putnički ili teretni saobraćaj. Da bi saobraćaj omogućio nesmetan razvoj privrede neophodno je stalno raditi da unapređenju usluga prevoza putnika i robe i pronalaženju novih načina za povećanje pouzdanosti prevoza. Cilj željezničkog saobraćaja je da obezbijedi takav sistem čija ekonomičnost, sigurnost i dostupnost uliva korisnicima povjerenje prilikom korišćenja i da sam sistem kao takav ostvaruje određene dobiti od pružene usluge.

Jedan od načina pomoću kojeg se dobijaju tačnije prognoze odvijanja saobraćaja na željeznici su simulacioni programi. Pomoću ovih softvera se vrši analiziranje sistema i kreiraju operativne, razvojne i strateške odluke. Sve to se obavlja na matematičkom modelu realnog sistema. Softver u ovakvim situacijama omogućava uvid u proces odvijanja saobraćaja na željeznici. Izbor simulacionog softvera se vrši u odnosu na podatke koje je potrebno dobiti. Moguće je dobiti jasnu sliku kretanja vozova na mreži pruga, izlazne podatke poput zabilježenih brzina koje je voz imao na određenim dionicama, koji su kolosjeci bili zaposjednuti određenim vozovima, koliko je bilo čekanje vozova i slično. Savremeni simulacioni softveri imaju mogućnost učitavanja već postojećih podataka koji su neophodni za izradu modela. Ti podaci se moraju prethodno nalaziti u arhivi simulacionog softvera ili u okviru nekog od kompatibilnih programa preko koga bi bilo moguće preuzeti podatke.

Planiranje željezničkih tokova može biti izuzetno izazovno iz razloga što poboljšanja različitih faktora mogu dati drugačije rezultate. Poboljšanja se mogu odvijati u tri kategorije: infrastruktura, vozni kapaciteti i operacije koje se odvijaju na posmatranom željezničkom sistemu. Potrebna je evaluacija poboljšanja svakog faktora zasebno kako bi se jasno vidio učinak i organizovao pravi investicioni plan. Neke željezničke uprave ovaj investicioni plan vide kao tri međusobno zavisna elementa čijom optimizacijom se mogu postići željeni rezultati. Grafički prikaz tog koncepta je dat u nastavku teksta. Pod uslugom i operacijama se podrazumijevaju organizacija prevoza ljudi i tereta. Vozni park čine različite garniture koje se koriste za prevoz, a infrastruktura ukazuje na sistem koji fizički omogućava pružanje već pomenutih usluga. Tu spadaju: pruge, signalni sistem, stanična postrojenja i slično.



Grafikon 1: Međusobna zavisnost elemenata u željezničkom sistemu

2. VRSTE I TIPOVI SIMULACIJA

U literaturi se najčešće izdvajaju četiri vrste simulacionih modela: Monte Karlo simulacija, kontinualna simulacija, simulacija diskretnih događaja i mješovita (kontinualno - diskretna) simulacija [1]. Ta podjela je izvršena prema korišćenom pristupu pri modeliranju i klasi problema koji se rješava simulacijom, kao i prema tehnikama modeliranja i simulacijama koje se izrađuju prema pomenutim modelima. Da bi sam proces simulacije bio što realniji, obavezno je korišćenje provjerenih i validnih ulaznih podataka. Takođe, neophodna je provjera i izlaznih podataka. S obzirom da su oni najčešće izraženi u obliku statističkih podataka, tabela i grafikona potrebno je određeno predznanje i iskustvo iz domena željezničkog saobraćaja da bi se adekvatno protumačili podaci ili angažovanje eksperta.

Simulacije u željezničkom saobraćaju su važne i korisne zato što se pomoću njih može dobiti bolji uvid u neke od sledećih aspekata:

- Razumijevanje kapaciteta - kapacitet je aspekt koji nije lako predvidjeti i prilagođavanje u slučaju većih promjena nije lako izvesti. Na jednoj željezničkoj liniji potražnja za prevozom može da varira od stanice do stanice. Proračun prave mjere kapaciteta može biti značajan izazov;
- Značaj infrastrukture - ovde se misli na međusobnu zavisnost infrastrukturnih projekata sa organizacijom prevoza. Remont određenog dijela trase će imati značajan uticaj na obavljanje prevoza. Manji remont i na pravim dionicama mogu da smanje vrijeme putovanja i tako olakšaju cjelokupnu organizaciju saobraćaja, a i ponude primamljiviju uslugu korisnicima prevoza. Simulacioni programi mogu ukazati na takve dionice i pri simulaciji prikazati moguće rezultate koji bi važili prilikom obavljenog remonta;
- Infrastrukturni troškovi - obavljanje remonta iziskuje visoke troškove. Pod troškovima se ne misli samo na fizičko izvođenje radova već i na troškove

koji nastaju prilikom obustavljanja saobraćaja na pruzi. Loša organizacija i greške u procjeni trajanja radova mogu doprinijeti dosta većim troškovima nego kada bi inženjeri imali tačan uvid u značaj remonta određenog dijela pruge.

Naglašavajući ove elemente, eksperti iz polja željezničkog saobraćaja savjetuju kreiranje što većeg broja simulacionih modela prije počinjanja konkretnih radnji na željezničkoj mreži [2]. Ideja vodilja je da - što se više simulacionih modela izradi to su manje šanse za pravljem greške. Simulacioni model je potrebno izraditi prema realnom postojećem stanju na mreži a zatim se mogu vršiti razne izmjene u svrhu sagledavanja stanja. Pomoću izučavanja modela se može ispitati valjanost reda vožnje, mogu se uočiti neophodne promjene na infrastrukturi, izvršiti poređenje upotrebe različitih tipova garnitura i sl. Svi uticaji potencijalnih promjena se mogu detektovati, verifikovati i ocijeniti, što i predstavlja suštinu ovakvih softverskih rešenja.

Simulacije, koliko god bile korisne, mogu imati i svoje nedostatke odnosno limite. Neki od tih limita su:

- da bi dobili validne podatke u program moraju biti ubačene vrijednosti koje oslikavaju aktuelno stanje na mreži pruga,
- operacije u okviru stanica se moraju kreirati posebno,
- ograničenja koja se tiču osoblja ne uzima u obzir većina softvera,
- simulacije uključuju samo modelovano područje,
- simulacioni programi su skloni uključivanju određene doze optimizma u slučaju nastanka zagušenja, pridržavanja reda vožnje i sl.

Navodeći nedostatke uočavamo da je iskustvo sa realnim stanjem nezamjenljivo ali da se približni rezultati mogu postići korišćenjem simulacionih softverskih rešenja. Uz adekvatno iskustvo, podatke i znanje procesi se mogu poboljšati bez bojazni od nepotrebnih troškova.

Saobraćajni procesi koji se odvijaju na prugama, stanicama i generalno na željezničkim mrežama se mogu analizirati pomoću simulacionih modela. Makro simulacioni modeli opisuju operacije na transportnoj mreži. S obzirom da se bave mrežama većih dimenzija, ovakvi modeli su pogodni za sagledavanje šire slike sistema. Obično se implementiraju u fazama planiranja kako bi se izvršile strateške procjene različitih infrastrukturnih scenarija. Nizak stepen detalja i apstraktnije razmatranje

infrastrukture, koji se usvaja u ovakvim modelima, utiče na tačnost rezultata. Znajući za takva ograničenja, jasno je da ovakvi modeli nisu u stanju da sagledaju aspekte poput rasporeda staničnih kolosjeka, signalno - sigurnosnih sistema ili čak procjene vremena vožnji. Jedan od primjera makrosimulacionih modela je „NEMO“, koji je razvio Univerzitet u Hanoveru.

Mikrosimulacioni modeli, sa druge strane, pokušavaju da oponašaju saobraćajne procese u određenom vremenskom periodu. Da bi se to obavilo, posmatra se svaki voz individualno, koriste se podaci o parametrima pruge, aktuelni red vožnje, karakteristike voznih sredstava i drugo. Mikropristup razmatra uticaj jednog voza na drugi kada se obavlja simulacija. Na primjer, kada jedan voz zauzme određeni odsjek pruge koji bi drugi voz želio da okupira, sistem će drugom vozu dodijeliti mjesto na pruzi prema sigurnosnim parametrima. Drugi voz će vjerovatno čekati da se željeni kolosjek oslobodi ili će biti prebačen na drugi.

Postoje dva tipa mikronivoa simulacionih modela: sinhroni i asinhroni. Asinhroni modeli simuliraju željeznički saobraćaj koristeći stohastički generisana vremena polazaka vozova. Kod ovog tipa modela simulacija se odvija u serijama, odnosno pojedinačno po vozovima. Na ovaj način se izrađuju redovi vožnje koji ne sadrže konflikte. U prvom krugu se modeluje voz sa najvećim rangom, zatim se vremena upisuju u red vožnje i nakon toga se pokreće sledeći voz po prioritetu. Princip se ponavlja do kompletiranja reda vožnje. U slučaju asinhronih simulacionih modela, drugi voz ne utiče na prvi, ali je drugi pod uticajem prvog. Na isti način se modeluju i svi ostali vozovi. Ovaj tip simulacije se koristi prilikom kreiranja reda vožnje za određene linije trasa, ali nije efikasan kada su u pitanju mreže pruga.

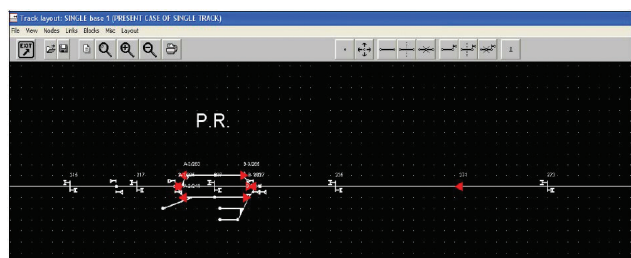
Istovremena (sinhrona) simulacija kretanja vozova, detaljni podaci o pruzi, redu vožnje i voznim sredstvima su odlika sinhronih simulacionih modela. Ovaj tip simulacije pruža realističnu sliku operacija na mreži pruga. Kod sinhronih modela je moguće ustanoviti pravila pomoću kojih program pravi odluke o otpremanju vozova kada postoje konfliktne situacije. Ta pravila mogu uključivati jednostavne prioritete kao npr. „putnički vozovi imaju prednost u odnosu na teretne“ i slično. Za dobre rezultate ovakvi vidovi simulacija zahtijevaju dosta vremena, detalja i podataka koji moraju biti unijeti u sistem.

3. RAILSYS

RailSys [3,4,5] koristi mikropristup za opisivanje modela iz realnih sistema, a sve sa ciljem smanjenja rizika od donošenja pogrešne odluke prouzrokovane lošim planiranjem saobraćaja. Ovaj program razvili su Univerzitet u Hanoveru i RMCon-a (Rail Management Consultants). Primjenjivao se na različitim projektima za potrebe preciznijeg prognoziranja željezničkog saobraćaja. Neki od projekata su bili: brza pruga u Njemačkoj i Australiji, željeznički sistemi Minhena, Sidneja, Melburna, željeznička mreža Berlina i Kopenhaga. Ovaj simulacioni sistem se sastoji od četiri modula koji čine srž sistema RailSys.

3.1. Upravljanje infrastrukturom

Funkcija ovog modula je sagledavanje realnog infrastrukturnog stanja (ukoliko ono već postoji) i kreiranje njegovih različitih varijanti. Tačnost ovakvih modela se svodi na jedan metar. Softver u model uključuje elemente poput: signalno-sigurnosnih signala, stanica, indikatora brzina, staničnih platoa. Prilikom modelovanja pruge, uzimaju se elementi koji su neophodni i prilikom projektovanja, a to su: maksimalna brzina, dužina i nagib. Sistem dozvoljava kreiranje više varijanti kako bi se odabrala najpovoljnija. Samim tim je moguće unositi različite elemente prema postojećem ili planiranom stanju pruge. Tu se ubraja APB (automatski pružni blok), praćenje signala i zaključavanje signala. Na kreiranom modelu se mogu uočiti cjeline poput stanica, čvorova i dionica pruga. Infrastruktura je zamišljena kao niz čvorova i dionica, gdje dionica simbolizuje prugu, a čvor je ili tačka povezivanja nekoliko pruga ili lokacija za signale i druge elemente. Prikaz jednog kreiranog modela je dat u nastavku teksta (Slika 1).

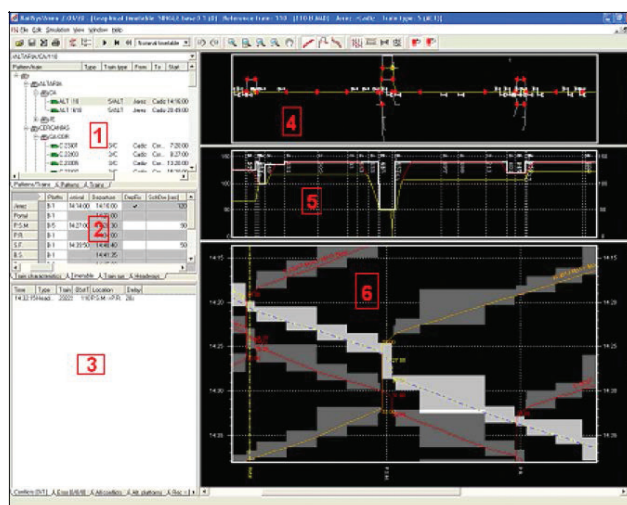


Slika 1. Prikaz infrastrukturnog rešenja u RailSys softveru

3.2. Organizovanje reda vožnje

Opcija koju nudi softver RailSys omogućava proračun tačnih vremena vožnji i njihovo transferisanje u red vožnje, koji je važeći prilikom odvijanja simulacije.

Na osnovu ove veze moguće je direktno posmatrati svaku promjenu koja se desi prilikom izbora neke druge putanje ili korišćenja drugog tipa lokomotiva. Svaka ruta i tip voza ima svoje karakteristike koje sistem povlači i na osnovu kojih se kreiraju izvještaji. Karakteristike vučnih vozila, prioriteta na osnovu kojih je uspostavljeno odvijanje vožnji, dozvoljene brzine i dispečerske postavke su elementi koji moraju biti na raspolaganju programu kako bi proračuni bili validni. Program ima zadatak da izvrši optimalnu alokaciju vozova u sistemu velikih željezničkih mreža i prilikom izvršenja tog zadatka program može ukazati na potencijalne probleme poput: konflikta vozova, nepostojećih konekcija i sl. Izgled softverskog rešenja za kreiranje reda vožnje je dat na slici 2. Odjeljci koji su označeni brojevima predstavljaju sljedeće: 1) hijerarhijski obrazac kretanja vozova; 2) tabela reda vožnje; 3) lista otkrivenih konflikata; 4) prikaz pruga; 5) dijagram brzine; 6) grafički prikaz reda vožnje.

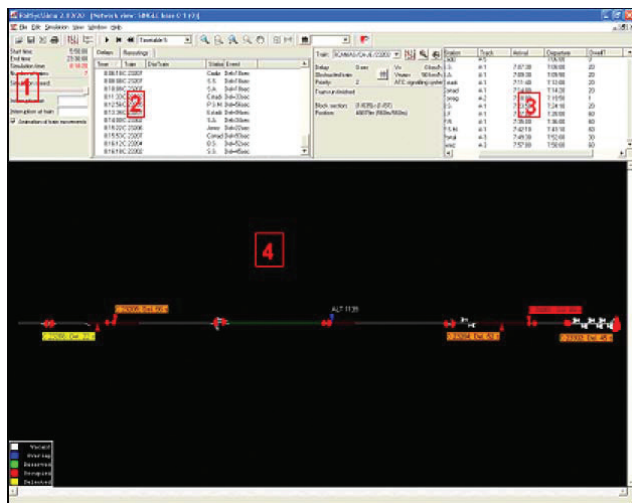


Slika 2. Primjer izrade reda vožnje

3.3. Izvođenje simulacije

Krucijalna mogućnost ovakvih softvera je mogućnost realizacije simulacije. Softver pruža mogućnost izvođenja pojedinačne simulacije koja služi u svrhu provjere kreiranog modela i da li su svi elementi postavljeni ispravno. Da bi se dobio model sličan realnosti, pokreće se cjelokupna simulacija. Zbog same prirode željezničkog saobraćaja, vozovi imaju veliki uticaj jedni na druge i taj uticaj se ispituje pomoću ovih simulacija. Kašnjenje jednog voza će najvjerovatnije izazvati kašnjenje drugog i nekog sljedećeg, sve u zavisnosti od planiranog reda vožnje. Ovakvi softveri prikazuju takve slučajeve i mogu uzeti u obzir promjenu rute vozova kako bi se kašnjenje što brže riješilo. Prikaz odvijanja simulacije je

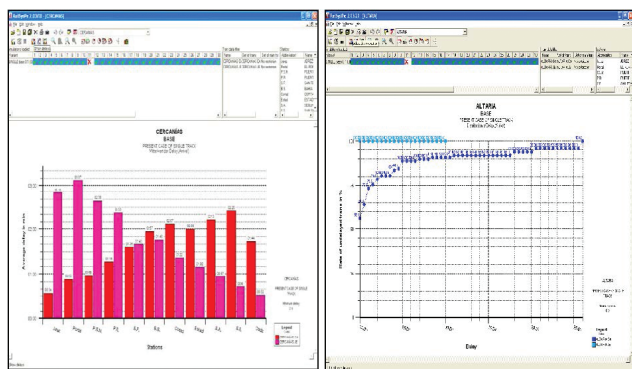
dat na slici 3. Numeričkim brojevima je označeno: 1) simulaciono vrijeme; 2) kašnjenja; 3) podaci o vozovima; 4) prikaz odvijanja simulacije sa svim vozovima i vremenima vožnji.



Slika 3. Primjer pokretanja simulacije u softveru

3.4. Evaluacija podataka

Veoma bitna stavka prilikom kreiranja modela je proučavanje povratnih informacija. Napomenuto je da čitanje takvih podataka obično obavlja osoba koja ima godine iskustva iz tog domena. U povratnim podacima koji mogu biti u obliku grafikona, raznih izvještaja i sl. mogu se vidjeti performanse simulacije. Dobijene podatke je moguće uporediti kako bi se izvršio izbor između više opcija. Rezultati mogu biti prikazani za cijelu mrežu, pojedinačne linije, stanice, samo za vozove i slično. Ta opcija je veoma bitna jer olakšava usredsređivanje na određeni parametar. Moguće je i prikupiti podatke kao što su: vremena polazaka i dolazaka, vremena kašnjenja, vremena bavljenja u stanicama, broj kašnjenja i slično. U prilogu su dati primjeri izvještaja nakon obavljene simulacije. Tačnije, dat je prikaz kašnjenja pri dolasku u svakoj stanici.



Slika 4. Prikaz izvještaja nakon odrađene simulacije

4. OPENTRACK

Program za simulaciju željezničkog saobraćaja na mreži pruga pod nazivom OpenTrack je razvijen sredinom devedesetih godina prošlog veka u okviru istraživačkog projekta Švajcarskog federalnog instituta za tehnologiju - Instituta za planiranje transporta i transportnih sistema [6, 7, 8, 9]. Cilj je bio razvijanje programa za simulaciju procesa na željeznici koji može da radi na različitim kompjuterskim platformama i može da odgovori na razne željezničke zahtjeve.

OpenTrack se može koristiti na sljedećim željezničkim sistemima:

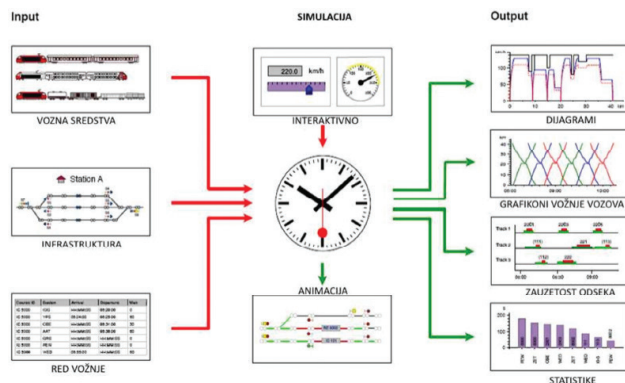
- vozovi velike brzine,
- međugradski saobraćaj,
- regionalni, prigradski i gradski saobraćaj,
- teretni vozovi (teški i dugi teretni vozovi),
- rudarska željeznica,
- podzemni gradski saobraćaj / metro,
- sistemi lakih šina,
- tramvajski saobraćaj,
- sistemi za prevoz putnika,
- željeznica sa zupčanicima / planinska željeznica,
- magnetska levitacija (Maglev, Transrapid).

Ovaj program omogućava obavljanje sledećih zadataka:

- izračunavanje vremena vožnji,
- izrada reda vožnje,
- analiza robusnosti i ostvarivosti reda vožnje (jedan ili više simulacionih serija; simulacija Monte Karlo),
- određivanje infrastrukturnih potreba,
- izračunavanje minimalnog slijeđenja vozova,
- planiranje faze sanacije i dionica smanjene brzine,
- analiza ponašanja postojećih, tj. budućih tipova vučnih vozila,
- analiza adekvatne upotrebe bezbjednosnih željezničkih sistema sa fiksnim dionicama, sa kratkim dionicama, sa dionicama promjenljive dužine, LZB, CBTC, ATP, ATO, ETCS nivo 1, ETCS nivo 2, ETCS nivo 3,
- ispitivanje ponašanja mreže u slučaju smetnji (npr. na infrastrukturi) i kašnjenja,
- proračun potrebne snage i potrošnje energije tokom vožnje,
- simulacija željezničke električne mreže.

Kao što je i do sada bio slučaj, ulazne podatke definiše korisnik. Tim podacima se upravlja preko tri modula: voznim sredstvima, infrastrukturom i pomoću reda vožnje. Simulacija se odvija tako što se unaprijed definisani vozovi kreću prema definisanoj pružnoj

situaciji prema uslovima koji su određeni redom vožnje. Nakon završetka simulacionog procesa dobijaju se izlazni podaci koji daju detaljan prikaz ulaznih podataka kroz razne dijagrame, grafikone i sl (Slika 5).



Slika 5. Šematski prikaz strukture simulacionog paketa

Strukturu softvera OpenTrack čine cjeline koje su već pomenute kao bitne stavke svakog simulacionog procesa, više o njima će biti u nastavku.

4.1. Vozna sredstva (lokomotive i vagoni):

Da bi se kompletirao jedan voz prilikom simulacije, potrebno je imati podatke o lokomotivama i vagonima koje ulaze u njegov sastav. Podaci o lokomotivama se čuvaju u bazi podataka koja se zove „Depot“ (Slika 6). Ova baza podataka već sadrži detalje o svim poznatijim tipovima lokomotiva, tj. njihove tehničke karakteristike. Tu spadaju: vučni dijagram, težina, dužina i adhezione vrijednosti. Korisniku je omogućeno da jednim klikom odabere tip lokomotive koja se koristi u modelu i samim tim je korak bliže odvijanju simulacije sa dobrim podacima. Ukoliko korisnik želi da ubaci nove vrijednosti lokomotive, postoji opcija i za to.



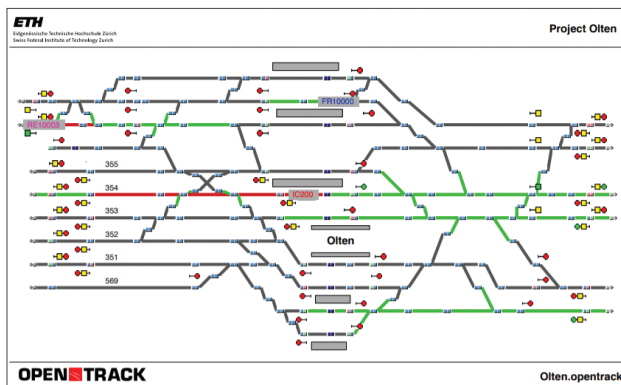
Slika 6. Prikaz tehničkih karakteristika vučnih sredstava

Željeznički vagoni nisu posebno definisani u softveru jer su za pokretanje simulacije potrebni samo podaci o njihovoj dužini i težini, tj. masi kompletnog voza. Prilikom odabira tipa lokomotive, broja vagona i njihove težine smatra se da je kreiran voz.

4.2. Podaci o kolosječnom stanju

Opis fizičkih parametara infrastrukture koja se koristi u simulaciji je neophodan, ako se žele dobiti vjerodostojni podaci. Ti parametri opisuju kolosječnu situaciju na mreži pruga. Oni obuhvataju elemente kao što su: dijelovi kolosjeka (označeni u aplikaciji kao „edges“), signali i stanice; kao i virtuelne elemente - vertekse („vertices“ - tačke promjene vrijednosti parametara) i rute.

Omogućeno je upravljanje kolosječnom situacijom koristeći se grafičkim prikazom. Korišćenjem editora za grafički prikaz i alata koji se nude u programu može se svakom kolosjeku dodijeliti dužina, nagib i maksimalna brzina. Svakoj tački preloma (verteksu) mogu se dodijeliti informacije poput imena, kilometarskog položaja na pruži i promjene stanja. Važna karakteristika ovog programa je to što opisuje kolosječno stanje primjenom metode grafova sa dvostrukim tačkama preloma („Double Vertex graphs“). Primjena ovog tipa grafova omogućava lakše upravljanje podacima u programu. U nastavku teksta je dat primjer izrađenog kolosječnog rješenja za stanicu Olten u Švajcarskoj (Slika 7).

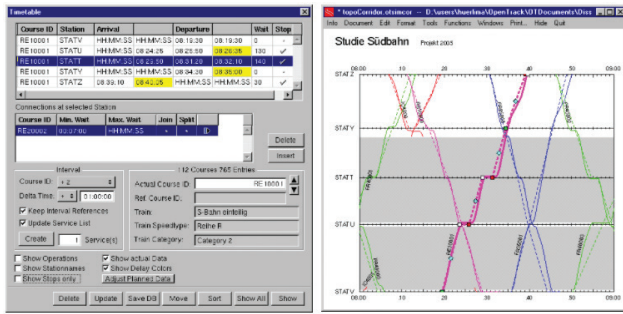


Slika 7. Primjer izrađenog staničnog rješenja u programu OpenTrack

4.3. Podaci o redu vožnje

Red vožnje se sastoji od informacija o kretanju vozova. Tu spadaju one o planiranim vremenima dolaska i polaska vozova, informacije o vezama vozova, minimalnim vremenima bavljenja u stanicama i informacije o presjedanju vozova. U OpenTrack - u se takvi podaci smještaju u dijelu „Timetable database“. Podatke o vremenima korisnik unosi sam ili povlači iz kompatibilnog programa sa OpenTrack- om, ukoliko je red vožnje već kreiran.

Korisnik može u svakom momentu da mijenja podatke u redu vožnje direktno u tabeli u tekstualnom formatu ili pomoću miša direktno u grafičkom prikazu reda vožnje. Tekstualni i grafički formati su prikazani na slici u nastavku (Slika 8).



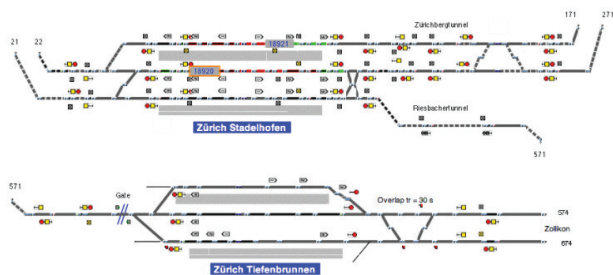
Slika 8. Izgled prozora za unošenje podataka u red vožnje

4.4. Simulacija

Kroz proces simulacije korisnik može da isprati kretanje vozova koje je kreirao na mreži pruga koju je takođe sam kreirao ili na već postojećem modelu. OpenTrack koristi mješovitu kontinualno - diskretnu metodu za modelovanje kretanja voza, što znači da je njihovo kretanje modelovano rješavanjem diferencijalne jednačine kretanja (kontinualni proces) u kombinaciji sa informacijama o stanju signalno - sigurnosnih uređaja (diskretni proces).

Pomoću diferencijalne jednačine kretanja izračunava se kretanje voza na osnovu najvećeg mogućeg ubrzanja za određeni vremenski period (stepen ubrzanja je određen karakteristikama voza i podacima o stanju pruge, kao što su maksimalna vučna snaga, otpor voza i nagib nivelete, poluprečnik krivine i maksimalno dozvoljene brzine). Vozovi poštuju red vožnje i kreću se prema njemu. Signalno - sigurnosni uređaji određuju pravila po kojima će se odvijati kretanje.

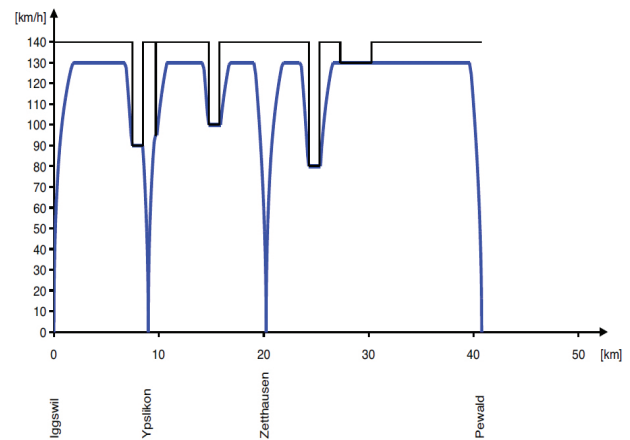
Na kretanje vozova utiču i signali koji kontrolišu stanje na pruzi. Na ponašanje vozova pri kretanju utiče još i zauzetost kolosjeka, vrijeme reagovanja signala ili stanje signala kada pokazuju zabranjenu vožnju. Tokom simulacije, svaki voz popunjava virtuelni tahograf (izlaznu datoteku), koji skladišti podatke kao što su ubrzanje, brzina i pređena udaljenost. Na kraju simulacije se ti podaci mogu vidjeti u obliku raznih izvještaja. Prikaz simulacije je dat na slici 9.



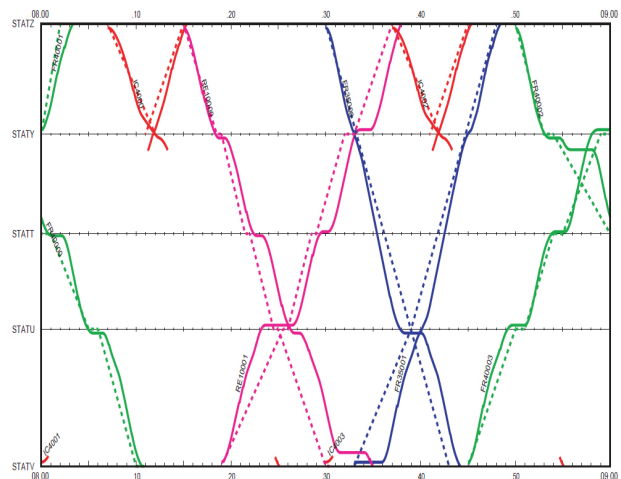
Slika 9. Prikaz pokrenute simulacije u OpenTrack programu

4.5. Izlazni podaci

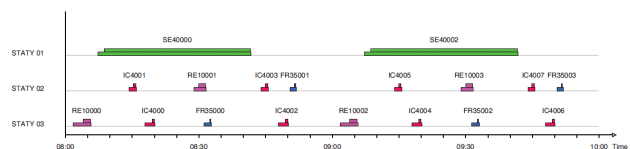
Nakon simulacije, OpenTrack nudi brojne evaluacije. Moguće su procjene voza, relacije ili stanice. Za vozove program nudi dijagrame kao što su ubrzanje u odnosu na udaljenost, brzina u odnosu na udaljenost i prepreke. Za relacije postoje izvještaji u obliku dijagrama kretanja voza, zauzetosti rute i profila. Za svaku stanicu je moguće dobiti izlazne podatke o svim vozovima koji su je koristili, uključujući vrijeme dolaska, zaustavljanja i polaska. Korisnik može prikazati izlazne podatke u dijagramu ili ih izvesti ili procijeniti u tabelama (Slike 10, 11 i 12).



Slika 10. Dijagram koji pokazuje odnos brzine i prijeđenog puta



Slika 11. Grafikon reda vožnje



Slika 12. Prikaz zauzetosti staničnih kolosjeka

5. TRENISSIMO

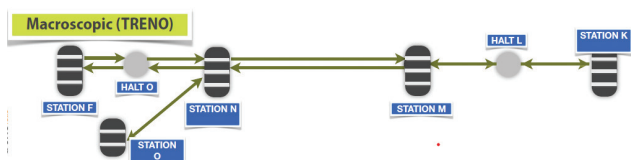
5.1. TRENO alati

TRENOLab kompanija pruža softverske i konsultantske usluge na polju željezničkog saobraćaja pomažući zainteresovanim klijentima u planiranju visokoeфикаsnih i pouzdanih redova vožnji, donošenju odluka za poboljšanje usluga koje pružaju i pronalaženju boljih rješenja [11, 12].

Paket koji je razvio TRENOLab se sastoji od tri pomoćna alata: TRENOAnalysis, TRENOPlus i trenissimo.

TRENOAnalysis je alat posebno dizajniran za pregled i analizu stvarnih i simuliranih podataka, pronalaženje kritičnih tačaka i izračunavanje pokazatelja pouzdanosti, predstavljajući ih pomoću širokog spektra dijagrama i statističkih podataka. Rezultati ovih analiza se mogu koristiti kao ulazni podaci za poboljšanje redova vožnje u TRENOPlus - u ili za stohastičku simulaciju željezničkih operacija koja se izvodi u trenissimo-u.

TRENOPlus je alat za kreiranje reda vožnje koji se koristi zarad integrisanja u ostale alate kako bi se vidjeli efekti koje on ostvaruje. Ova alatka integriše makro i mikropriступ preko modela mreže kako bi se omogućilo procjenjivanje vremena vožnji, bavljenja u stanicama i vremena čekanja. U zavisnosti od raspoloživog vremena i podataka, korisnik može slobodno odlučiti da koristi jednu od ove dvije alatke, pa čak i njihovu kombinaciju. U nastavku primjećujemo prikaz željezničke mreže koji uključuje rastojanje, relacije između stanica i same stanice.



Slika 13. Prikaz željezničke mreže makrotipa u TRENOPlus - u

Treća alatka odnosno trenissimo je razvijen sa posebnim ciljem da dobije realističniju simulaciju željezničkih operacija, kombinujući nove karakteristike i funkcionalnosti koje još uvijek ili samo djelimično nisu implementirane u postojeće alate. On koristi mikropriступ i sposoban je da razmotri mnoge faktore koji utiču na željezničke operacije. Jedna od najvažnijih inovacija je predstavljanje mašinovođe i dispečera kao subjekata koji voze vozove prema voznom redu i sistemu signalizacije

i kontrolišu ih na osnovu zadatih kriterijuma ili algoritama. Druga karakteristika je kontrola signala, kao i u realnosti. Treća je mogućnost da se u realnom vremenu razmotri uticaj broja putnika koji čekaju na peronu na vrijeme zadržavanja vozova i na taj način pravilno predstavi njihov efekat. U slučaju prikazivanja željezničke mreže kod ove alatke primjećuje se detaljniji pristup u odnosu na prethodnu. Ovde su uključeni signali, kolosjeci, ograničenja brzine i sl.



Slika 14. Prikaz željezničke mreže mikrotipa u trenissimo - u

5.2. Funkcije trenissimo alata

Trenissimo je zasnovan na iskustvu stečenom za nekoliko godina rada, a razvijen je sa posebnim ciljem da prevaziđe slabosti, dobivši alat koji:

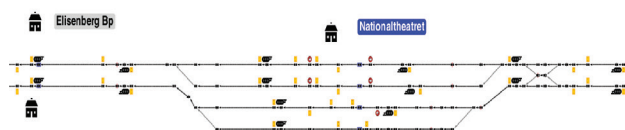
- savršeno je integrisan u paket koji pokriva sve faze planiranja i to bez nedostatka premještanja datoteka među alatima;
- može se koristiti na svim računarima sa svim operativnim sistemima;
- kombinuje najveću tačnost sa razumnim vremenom izračunavanja, koristeći sve dostupne resurse;
- može ispravno prikazati bilo koji sistem za blokiranje i signalizaciju, uključujući sve aspekte signala i odgovarajuće ponašanje vozača;
- omogućava realno otpremanje vozova bez upotrebe spoljnih alata;
- predstavlja ljudski faktor i druge stohastičke komponente sa najvećom tačnošću, posebno u pogledu vremena zadržavanja i vremena vožnje;
- pogodan je za izvođenje stohastičke analize osjetljivosti uzimajući u obzir kombinovani uticaj više parametara;
- kompatibilan je sa standardnim formatom RailML;
- može pravilno razmotriti odnos između broja putnika i vremena boravka, posebno u visokofrekventnim uslugama.

Kao i prethodna rješenja za modeliranje i ovo ima dio gdje se unose ulazni podaci, pokretanje simulacije i izlazne podatke koji mogu biti u obliku raznih formi. Jasno je da program mora raditi sa validnim podacima kako bi vratio dobre izlazne podatke i kako bi sama simulacija imala smisla.

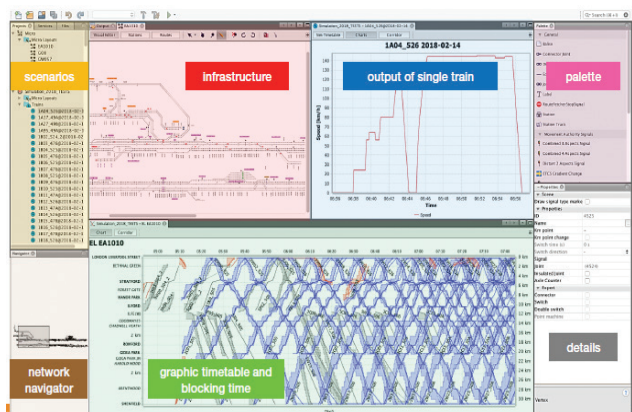
Ulazni podaci u okviru trenissimo alata su podijeljeni u 6 grupa (Slika 15):

1. Pravila: opšta pravila/postavke zemlje/mreže: vrste brzine, aspekti signala, napajanje.
2. Makroinfrastruktura: svaka stanica je predstavljena tačkom, a rute su formirane jednostavnim linijama koje ih povezuju. Ovakav prikaz željezničke mreže stvara savršenu kompatibilnost sa alatom za planiranje TRENOPlus i svi makromodeli su sačuvani u njemu.
3. Mikroinfrastruktura: mikrotip željezničkih mreža, kompletan raspored stanica, ograničenja brzine, sistem signalizacije.
4. Simulacijski podaci: dio mreže na kome se vrši simulacija.
5. Vozni park: tehničke karakteristike voznih sredstava.
6. Red vožnje: u vrlo jednostavnom formatu koji proizvodi TRENOPlus.

Trenissimo baš kao i prethodno pomenuti modeli koji rade na mikronivou modeliranja radi po principu unošenja ulaznih podataka iz domena voznih sredstava, infrastrukture i reda vožnje (Slika 17). Nakon unijetih neophodnih podataka moguće je pristupiti simulaciji. TRENO koncept je različit po tome što se sastoji iz tri posebne alatke. Iz TRENOPlus - a mogu se povući podaci koji se nalaze u kategoriji ulaznih podataka, zatim se prelazi na trenissimo u kome se odvija simulacija i nakon završene simulacije se vrši tumačenje podataka. Izlazne podatke je moguće pročitati u trenissimo - u, ali s obzirom na povezanost alatki, lako se mogu prebaciti u neku drugu.



Slika 17. Kreiranje željezničke mreže za pokretanje simulacije

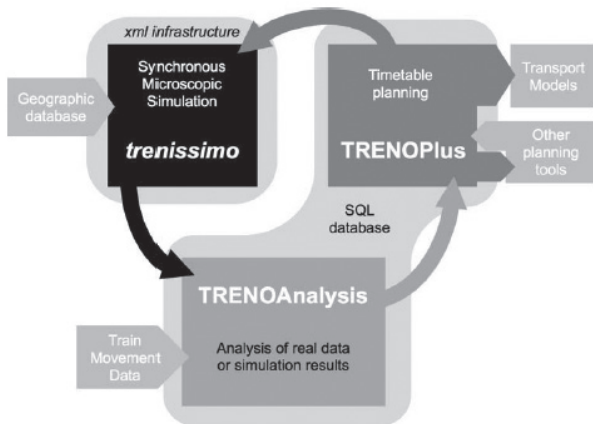


Slika 15. Radna površina u trenissimo - u

Kombinacijom ovih ulaza formira se projekat (Slika 16). Promjena u okviru bilo kojeg od njih će uticati na projekat, u smislu da se kreira novi. Interfejs programa je jednostavan za upotrebu i pregledan. Korisnicima omogućava lako korišćenje i mnoštvo opcija koje su tu da bi ispunile zahtjeve i kompleksnih projekata.

Grafički editor omogućava vrlo intuitivno uređivanje infrastrukture i pojednostavljuje kreiranje vozova. Daje najveću fleksibilnost u predstavljanju specifičnih karakteristika svake stanice i trase, bez nametanja upotrebe unaprijed definisanih blokova. Infrastrukturu je moguće povući u projekat iz datoteka RailML. Infrastruktura se može grafički urediti kao prevlačenje i ubacivanje elemenata ili uvesti kao tabela.

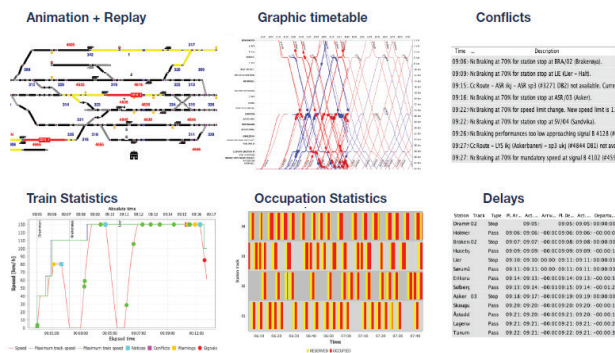
Kao i OpenTrack i ovaj alat reprodukuje željezničke operacije pomoću diskretne jednačine pomoću koje izračunava kretanja vozova na kontinuiran način. Jedna od ključnih prednosti trenissimo -a je da se i dispečer simulira: kao u realnosti. Dispečer uvijek kontroliše operacije: može donositi odluke na osnovu jednostavnih pravila ili složenijih algoritama.



Slika 16. Princip rada TRENO programa

Osim snimljene simulacije koja prikazuje vozove koji se kreću po mreži, uključujući i promjene signala, trenissimo daje klasične grafičke redove vožnje, statistiku i izlazne podatke. Prikaz ovih podataka može biti u raznim oblicima: tabela, dijagram, grafikon. Ovaj alat je veoma temeljan što se tiče izvještaja. Mogu se dobiti rezultati za jednu trasu, stanicu ili cjelokupnu željezničku mrežu. Razni su elementi koji se mogu ispitati: zauzeće kolosjeka, signali, mogući konflikti, vremena bavljenja u stanicama i dr. U daljem tekstu su prikazani tipovi izvještaja koji se mogu susresti u trenissimo -u (Slika 18).

Mikrosimulacioni modeli u željezničkom saobraćaju



Slika 18. Tipovi izvještaja u trenissimo - u

6. ZAKLJUČAK

Nagli rast korišćenja računara i pogodnost automatizacije željezničkih sistema doprinijeli su razvoju programa za modeliranje. Alati za simulaciju su prvo mogli simulirati manje mreže razmatrajući sve vozeve na deterministički način. Ovi alati su se uglavnom koristili kao podrška pri planiranju infrastrukture, a posebno za procjenu infrastrukturnih kapaciteta. Danas, ovakvi programi se koriste u razne svrhe kao što su:

- procjena pouzdanosti reda vožnje;
- upoređivanje performansi prilikom uvođenja promjena na modelu;
- procjena efekata sekundarnih kašnjenja među linijama i čvorovima;
- procjena efekata kašnjenja na usluge koje se pružaju;
- procjena kapaciteta koji se odnosi na date nivoe pouzdanosti.

U radu su pomenuti programi poput RailSys, OpenTrack i trenissimo. Svim ovim programima je zajednički mikropriступ simulacijama, odnosno pristup koji detaljnije prikazuje željezničku mrežu. Mikropriступ pokušava da oponaša saobraćajne procese u određenom vremenskom periodu. U njima se posmatra svaki voz individualno, koriste se podaci o parametrima pruge, aktuelni red vožnje, karakteristike voznih sredstava, signalno - sigurnosni uređaji itd.

Svaki od ovih programa ima svoje karakteristike i elemente po kojima je jedinstven međutim, ono što ih povezuje je princip rada. Potrebno je u program unijeti ulazne podatke poput infrastrukture, voznih sredstava i reda vožnje kako bi se simulacija mogla pokrenuti. S obzirom da se simulacija odvija po nekim pravilima, ulazni podaci moraju biti izuzetno jasni i precizni. Čak i najmanji propust bi mogao dati drugačije rezultate i takoreći bi se dobilo novo idejno

rješenje neke saobraćajne situacije. Izlazni podaci su poslednji korak simulacije i tu program vraća detaljne podatke o elementima koji su bili uključeni u proces razmatranja. Bitan je način na koji se ti podaci tumače i ekspertiza onoga ko ih proučava. Iskustvo igra ulogu i u odabiru vrste izlaznih podataka, u smislu da li se traže podaci za pojedinačne elemente projekta ili za cjelokupan.

Evidentno je da mogućnost prenošenja realne saobraćajne situacije na jedan od programa čini mnogo za razvoj željezničkog saobraćaja. Takav proces bi smanjio troškove, mogao povećati efikasnost sistema, pomogao pri donošenju pravih odluka rukovodstva, možda čak i donio neke nove ideje za posmatrani projekat.

LITERATURA

- [1] Čičak M: Modeliranje u železničkom saobraćaju, Beograd, Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu, 2003;
- [2] Jeremic D, Milinković S, Kasalica S, Simulating Train Dispatching: Logic with High-Level Petri Nets. Tehnički vjesnik 28 (2), 639-648, 2021;
- [3] Barber F, Abril M, Salido M. A, Ingolotti L. P, Tormos P, Lova A: Survey of automated Systems for Railway Management, DSIIC, p. 65, 2007;
- [4] Radtke A, Bendfeldt J. P: Handling of railway operation problems with RailSys, Institute of Transport, Railway Construction and Operation (IVE), p.9, 2001;
- [5] Rail Management Consultants International GmbH [http://www. https://www.rmcon-int.de/railsys-en](http://www.rmcon-int.de/railsys-en);
- [6] Heurilimann D, Nash A. B: OpenTrack - simulacija saobraćaja na željezničkoj mreži Verzija 1.9, Institute for Transport Planning and Systems, Zurich, Prevod na srpski jezik: Zorica Milanović;
- [7] Vuković M, Milinković S, Vesković S: Korišćenje simulacionog modela OpenTrack za analizu elemenata planiranog reda vožnje i za konstrukciju trasa reda vožnje, Željeznice, pp. 27-42, 2018;
- [8] Fischer U, Mirković S, Milinković S, Schöbel A: Possibilities for integrated timetables within the Serbian railway network. Facta

- universitatis-series, Mechanical Engineering 10 (2), 145-156; (2012);
- [9] Milosavljević M, Milinković S, Vesković S, Brnović I, Aćimović S: Analiza sistema BG voza primenom simulacionog paketa OpenTrack, Železnice, pp. 473-478, 2019;
- [10] Schöbel A, Aksentijević J, Hürlimann D: "Simulacija realnog rada mreže korišćenjem Kronekerove algebre (proizvod) za optimizaciju protoka saobraćaja", Železnice, pp. 165-173, 2017;
- [11] De Fabris S, Medeossi G, Montanaro G: Trenissimo: Improving the microscopic simulation of railway networks, Computers in Railways XVI, Vol. 181, pp. 199-211, 2019;
- [12] Veb sajt <http://www.trenolab.com>.