

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Sanjin M. Milinković

**METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE
OPTIMALNOG REŠENJA RASPUTNICE**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Sanjin M. Milinković

**METHODOLOGY TO DETERMINE A
RAILWAY JUNCTION OPTIMAL
DESIGN**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE
OPTIMALNOG REŠENJA RASPUTNICE
doktorska disertacija

Sanjin M. Milinković
Univerzitet u Beogradu
Saobraćajni fakultet

MENTOR: Prof. dr Katarina Vukadinović, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Članovi Komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije:

Prof. dr Katarina Vukadinović, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Prof. dr Slavko Vesković, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Doc. dr Gordan Stojić, docent,
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

DATUM ODBRANE: _____

Sanjin M. Milinković
METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE OPTIMALNOG REŠENJA RASPUTNICE
doktorska disertacija
Beograd, 2013
Univerzitet u Beogradu
Saobraćajni fakultet

Ključne reči: železnički saobraćaj, rasputnice, kašnjenje vozova, simulaciono modeliranje, Petrijeve mreže, fazi logika, veštačke neuronske mreže, adaptivni neuro-fazi sistemi.

Naučna oblast: Tehničko-tehnološke nauke, područje Saobraćaj

Uža naučna oblast: Eksploatacija, bezbednost, modeliranje i planiranje železničkog saobraćaja

UDK broj: 656.2 (043.3)

SAŽETAK

Simulaciono modeliranje je veoma efikasan alat za analiziranje složenih železničkih sistema kao što su sistemi saobraćaja vozova na rasputnici. Rasputnica je službeno mesto gde se sa otvorene pruge odvaja druga pruga. Model sistema rasputnice predstavlja procese kretanja vozova preko izolovanih odseka sistema rasputnica. Granice modela postavljaju se u stanicama koje okružuju rasputnicu. Model Petrijevih mreža sistema rasputnice razvijen je tako da je svaka vrsta odseka predstavljena modulom (podsystemom) u grafu Petrijevih mreža. Izrada modela sistema rasputnice vrši se povezivanjem modula odseka po planu odseka, a zatim i njihovim obeležavanjem i definisanjem. Ulazni podaci potrebni za izvršenje simulacije, definišu se u bazi podataka koja je povezana sa simulacionim programom.

Ulazni podaci o primarnom kašnjenju vozova generišu se u posebnom modelu ili modulu fazi Petrijeve mreže. Modeli kašnjenja vozova zasnivaju se na tehnikama računarske inteligencije. U slučaju kada postoje statistički podaci o prethodnim kašnjenjima, za proračune kašnjenja koriste se modeli zasnovani na neuronskim mrežama ili adaptivni neuro-fazi modeli. Ovi modeli se obučavaju i verifikuju podacima koji dobijenim praćenjem kretanja vozova i iz dnevnika otpravnika vozova. Kada nisu dostupni podaci o kašnjenju vozova u prethodnom periodu, primenjuje se model zasnovan na fazi logici, gde se ekspertska znanje o ponašanju sistema koristi za kreiranje modela.

U toku izvršenja simulacije, podaci o kretanju voza i zauzetosti odseka snimaju se u unapred definisanu bazu podataka. Stanja odseka i kretanje vozova tokom simulacije može se pratiti pomoću animacije i grafikona saobraćaja vozova. Baza podataka u kojoj se nalaze rezultati simulacije prilagođena je za jednostavnu obradu podataka i analizu rezultata.

Model je testiran na primeru rasputnice „G“ beogradskog železničkog čvora. Nakon izrade, validacije i verifikacije modela rasputnice „G“, analizirani su rezultati modela preko sekundarnih kašnjenja vozova nastalih u sistemu rasputnice. Takođe, upoređena su različita infrastrukturna rešenja rasputnice.

KLJUČNE REČI: železnički saobraćaj, rasputnice, simulaciono modeliranje, Petrijeve mreže, fazi logika, veštačke neuronske mreže, adaptivni neuro-fazi sistemi.

ABSTRACT

Simulation modelling is very efficient method for analysis of complex railway systems like railway junction system. Junction is a place on the track where another track diverges. Model of the junction system is comprised of the processes of train movement on insulated sections. Model boundaries are stations that are surrounding the junction system. Petri Net model of the junction system is defined as a model where all types of section blocks are denoted by a module or subsystem in the Petri Nets Graph. Building of the model is a process of connecting modules according to the junction section plan and then marking and defining them. Initial data for simulation is located in an external database connected to the simulation program.

Input data on train primary delay is calculated either in separate model or in the fuzzy Petri net module. Models for calculating train primary delay are based on computational intelligence techniques. When there are historical data on train delays, primary delays are calculated by neural networks or adaptive neuro-fuzzy model. These models are trained and verified by data on previous train delays (from train detection systems or from dispatcher's logs). When there are no data on previous delays in system, delays are calculated by a fuzzy logic model where experts' knowledge on system behaviour is used to create a model.

During simulation run data is exported to external predefined database. State of the sections and train movements are observed in animation window and in the trains' time-distance graph. Database of simulation results is improved for data query and data analysis.

Model is tested on a case study of junction "G" system located in Belgrade Railway Node. After model building, validation and verification of model, data results of simulation are analysed by secondary delays generated within the model. Also, different infrastructure solutions are compared.

KEYWORDS: Railway Traffic, Junctions, Simulation Modelling, Petri nets, Fuzzy logic, Artificial neural networks, Adaptive network fuzzy inference system (ANFIS)

SADRŽAJ:

1	UVOD.....	1
2	RASPUTNICE	8
2.1	Uvod.....	8
2.2	Pojam i definicija rasputnice.....	9
2.3	Tipovi rasputnica	11
2.4	Propusna moć pruge i organizacija saobraćaja vozova na rasputnici	14
2.4.1	Rasputnice na jednokolosečnim prugama	15
2.4.2	Rasputnice na dvokolosečnim prugama.....	19
2.5	Rezime	20
3	SIMULACIJE U ŽELEZNIČKOM SAOBRAĆAJU	22
3.1	Uvod.....	22
3.2	Izrada simulacionog modela	22
3.3	Prednosti i nedostaci simulacije.....	24
3.4	Validacija i verifikacija.....	25
3.5	Primena simulacije u železničkom saobraćaju.....	26
3.6	Rezime	28
4	TEORIJA PETRIJEVIH MREŽA I NJIHOVA PRIMENA U SIMULACIONOM MODELIRANJU.....	30
4.1	Uvod.....	30
4.2	Petrijeve mreže.....	31
4.3	Teorijske postavke Petrijevih mreža	32
4.3.1	Princip rada Petrijevih mreža	33
4.3.2	Osobine Petrijevih mreža	35
4.3.3	Prednosti Petrijevih mreža u modeliranju	36
4.4	Petrijeve mreže visokog nivoa	38
4.4.1	Obojene Petrijeve mreže	40
4.4.2	Vremenske Petrijeve mreže.....	41
4.5	Fazi Petrijeve mreže.....	43
4.6	Rezime	47

5	MODELIRANJE KAŠNJENJA VOZOVA	48
5.1	Uvod.....	48
5.2	Kašnjenje vozova	50
5.3	Uzroci kašnjenja vozova	51
5.4	Kašnjenja vozova na Železnicama Srbije	55
5.5	Predlog modela za proračun kašnjenja vozova	62
5.6	Priprema podataka za izradu modela kašnjenja vozova.....	63
5.7	Model proračuna kašnjenja vozova zasnovan na fazi logici.....	64
5.8	Adaptivni neuro-fazi model prognoze kašnjenja vozova.....	70
5.9	Model veštačke neuronske mreže za proračun kašnjenja vozova.....	73
5.10	Prognoza kašnjenja vozova višestrukom linearnom regresijom.....	75
5.11	Rezultati modela	77
5.12	Rezime	80
6	SIMULACIONI MODEL PETRIJEVIH MREŽA SAOBRAĆAJA VOZOVA	82
6.1	Uvod.....	82
6.2	Priprema objekata Petrijeve mreže za izradu modela saobraćaja vozova.....	83
6.3	Moduli u simulacionom modelu saobraćaja vozova.....	92
6.4	Primena fazi Petrijevih mreža u modelu kašnjenja vozova	99
6.5	Rezime	104
7	PRIMENA PETRIJEVIH MREŽA ZA MODELIRANJE ODABRANE RASPUTNICE.....	105
7.1	Uvod.....	105
7.2	Mogućnosti primene Petrijevih mreža za simulaciju saobraćaja vozova	106
7.3	Izrada simulacionog modela odabrane rasputnice	107
	7.3.1 Karakteristike i opis ulaznih podataka za simulacioni model	110
	7.3.2 Saobraćaj vozova u blokovnom razmaku pri APB-u.....	113
7.4	Model Petrijevih mreža rasputnice “G”	114
8	REZULTATI I ANALIZA REZULTATA.....	121
8.1	Uvod.....	121
8.2	Primena simulacionog modela rasputnice za operativnu i taktičku analizu	123
8.3	Primena simulacionog modela rasputnice za strateško planiranje.....	130
9	ZAKLJUČAK	136

10 LITERATURA.....	141
PRILOG	145
Prilog I - Postupci za verifikaciju i validaciju simulacionog modela	146
Prilog II - Istorijski razvoj Petrijevih mreža	149
Prilog III – Rečnik pojmova Petrijevih mreža	151
Prilog IV- Softverski paketi za primenu Petrijevih mreža.....	153
Prilog V - Modul fazi Petrijeve mreže za rešavanje konflikata vozova	154
Prilog VI – Deo beogradskog železničkog čvora sa rasputnicom „G“	156
Prilog VII – Alternative denivelacije rasputnice „G“	157
Biografski podaci o kandidatu	158

LISTA SLIKA U RADU:

Slika 2.1 Prva rasputnica na pruzi sa parnom vučom u Erlstounu u Engleskoj	9
Slika 2.2 Linijski prikaz rasputnice na jednokolosečnoj pruzi	9
Slika 2.3 Šematski prikaz rasputnice na dvokolosečnoj pruzi.....	10
Slika 2.4 Šeme rasputnica za povezivanje jednokolosečne i dvokolosečne pruge.....	12
Slika 2.5 Šeme rasputnica za povezivanje dvokolosečnih pruga	13
Slika 2.6 Rešenja rasputnice za različiti broj koloseka	13
Slika 2.7 Intervali prelaska vozova na rasputnicama	15
Slika 2.8 Elementi za proračun vremena prolaska voza na rasputnici	16
Slika 2.9 Grafikon saobraćaja vozova preko rasputnice na dvokolosečnim prugama ...	19
Slika 3.1 Šematski prikaz simulacionog paketa za saobraćaj vozova	28
Slika 4.1 Primer grafa Petrijeve mreže	32
Slika 4.2 Predstavljanje osnovnih mogućnosti sistema Petrijevih mreža.....	37
Slika 5.1 Vremena vožnje vozova za 1989/1990 i 2012/2013	56
Slika 5.2 Prosečan broj vozova koji kasne po satima u toku dana	58
Slika 5.3 Medijana kašnjenja po mesecima i po danima u toku nedelje	58
Slika 5.4 Medijana sa interkvartilnim opsegom kašnjenja po pravcima	59
Slika 5.5 Kašnjenje vozova po smerovima (u satima).....	60
Slika 5.6 Prosečna dolazna kašnjenja u Rakovici po period dana.....	62
Slika 5.7 Funkcija pripadnosti fazi skupova ulaznih i izlazne promenljive	68
Slika 5.8 Kriva zavisnosti ulaznih i izlazne fazi promenljive	68
Slika 5.9 Primer proračuna kašnjenja aproksimativnim rezonovanjem MAX-MIN kompozicijom..	69
Slika 5.10 Struktura ANFIS modela.....	71
Slika 5.11 Funkcije pripadnosti fazi skupova izlazne i ulaznih promenljivih.....	72
Slika 5.12 Odnos izlaznih i ulaznih promenljivih	72
Slika 5.13 Greška prognoze modela kašnjenja	78
Slika 5.14 Raspodela frekvencija kašnjenja vozova.....	78
Slika 5.15 Poređenje prognoziranih sa stvarnim kašnjenjima za vozove iz verifikacionog uzorka	80
Slika 6.1 Osnovni prozor ExSpecta.....	85
Slika 6.2 Definicije u ExSpectu.....	88
Slika 6.3 Definicije funkcija ExSpecta.....	90

Slika 6.4 Definicija tipa u ExSpectu – tip voz	91
Slika 6.5 Definicija tipa u ExSpectu – tip info	91
Slika 6.6 Šema Petrijeve mreže za dva karakteristična modula	93
Slika 6.7 Modul prostornog odseka.....	94
Slika 6.8 Definicije ulazodseksignala i izlazodseksignala	95
Slika 6.9 Moduli rasputnice-ulivni tok i izlivni tok.....	95
Slika 6.10 Modul koloseka	96
Slika 6.11 Modul kosog ukrštaja	96
Slika 6.12 Modul generisanja vozovai definicija procesora.....	97
Slika 6.13 Šema Petrijeve mreže modela fazi pravila	100
Slika 6.14 Modul fazi Petrijeve mreže za proračun primarnog kašnjenja.....	103
Slika 7.1 Šema dela čvora sa rasputnicom „G“	108
Slika 7.2 Kolosečna šema sistema rasputnice “G”	109
Slika 7.3 HLPN model rasputnice „G“	116
Slika 7.4 Detalj HLPN modela rasputnice „G“ sa modulom odseka	117
Slika 7.5 Animacija stanja odseka u modelu rasputnice „G“	118
Slika 7.6 Animacija tokena i indikatori stanja mesta	119
Slika 7.7 Podloga za crtanje grafikona izvršenja toka simulacije	120
Slika 8.1 Zavisnost nivoa apstrakcije modela od ciljeva simulacije	121
Slika 8.2 Tabela pregled podataka u Excelu sa filtriranjem po vozu.....	124
Slika 8.3 Tabela pregled podataka u Excelu sa filtriranjem po odseku	124
Slika 8.4 Šema izolovanih odseka sistema rasputnice „G“	125
Slika 8.5 Histogram intervala između nailazaka teretnih vozova u Rakovici.....	126
Slika 8.6 Deo grafikona saobraćaja vozova na rasputnici „G“	127
Slika 8.7 Zauzetost pojedinih odseka u 10 replika simulacije.....	128
Slika 8.8 Prosečno zadržavanje na IZLKOLRAK sa intervalom pouzdanosti	129
Slika 8.9 Šema izolovanih odseka rasputnice „G“ za Alternativu I	131
Slika 8.10 Šema izolovanih odseka rasputnice „G“ za Alternativu II.....	131
Slika 8.11 Šema izolovanih odseka rasputnice „G“ za Alternativu III	131
Slika 8.12 Sekundarna kašnjenja u modelu rasputnice	133
Slika 8.13 Grafikon kretanja vozova sistema rasputnice.....	135

LISTA TABELA U RADU:

Tabela 2.1 Proračunate vrednosti intervala prelaska preko rasputnice	17
Tabela 2.2 Propusna moć pruga u zavisnosti od broja vozova po pravcima.....	18
Tabela 4.1 Neke od interpretacija prelaza i mesta.....	34
Tabela 5.1. Osnovni uzroci nastanka primarnih kašnjenja.....	52
Tabela 5.2 Statistički podaci o kašnjenju vozova.....	57
Tabela 5.3 Pokazatelji dolaznih kašnjenja putničkih vozova ka severu u Rakovici	61
Tabela 5.4 Prosečni rezultati treninga mreža po mrežnim topologijama	75
Tabela 5.5 Koeficijenti višestruke linearne regresije	76
Tabela 5.6 Matrica korelacija promenljivih u VLR	76
Tabela 5.7 Rezultati testiranja modela kašnjenja vozova.....	77
Tabela 5.8 Rezultati modela kašnjenja za verifikacioni uzorak	79
Tabela 7.1 Karakteristike vozova za proračun vremena zauzetosti odseka	111
Tabela 8.1 Prognozirani broj vozova u redu vožnje za simulacioni period (10 dana) .	132
Tabela 8.2 Ukupno vreme zauzetosti odseka za period od 10 dana (u satima).....	134

1 UVOD

Rasputnica je službeno mesto gde se sa otvorene pruge odvaja druga pruga. Zbog specifičnih uslova i pravila organizacije saobraćaja, rasputnice se mogu posmatrati kao složeni sistemi. Kod analize takvih sistema moraju se uzeti u obzir susedne stanice kao granice sistema kao i plan odseka, pravila saobraćaja vozova, raspored signala i red vožnje vozova. Simulacija saobraćaja vozova u železničkim sistemima veoma je kompleksna zbog mnogih parametara i mnogih relacija koje je potrebno definisati da bi se opisao takav sistem. Složeni sistemi sastoje se od skupa međusobno povezanih podsistema. Da bi se složeni sistem modelirao, mora se podeliti na osnovne podsisteme ili module. Moduli su definisani tako da predstavljaju osnovne, jednostavne procese koji se dešavaju u sistemu. Simulacioni alat koji se koristi za izradu modela saobraćaja vozova mora biti u stanju da napravi model koji uključuje sve principe organizacije i pravila saobraćaja, ali i da ih poveže sa ulaznim podacima. Simulacioni modeli su detaljan opis železničkog sistema u kom se prati međusobna interakcija vozova koja zavisi od reda vožnje, infrastrukture i pravila saobraćaja. Zbog toga, simulacioni modeli zahtevaju podatke o infrastrukturi, redu vožnje i karakteristikama vozova (*Hansen i Pachl, 2008*). Ako je neki od ovih podataka nepoznat, potrebno je uvesti pretpostavke, a od kvaliteta pretpostavki i ulaznih podataka zavisice i kvalitet rezultata simulacionog modela. Alati za mikro simulaciju koriste se za modeliranje prenošenja kašnjenja vozova u železničkim mrežama, ali njihova upotreba zahteva i veliki rad na modeliranju železničke infrastrukture, pravilima saobraćaja i reda vožnje vozova. Najpoznatiji alati za simulaciju saobraćaja vozova su programski paketi *OpenTrack* i *Railsys* (*Barber et al., 2007, Hansen i Pachl, 2008*).

Kao alat za izradu simulacionog modela saobraćajnog sistema rasputnice izabrane su Petrijeve mreže. Petrijeve mreže se koriste za grafičko i matematičko modeliranje različitih sistema. Petrijeve mreže visokog nivoa (*High Level Petri Nets – HLPN*), koje uzimaju u obzir i podatke o vremenu, boji i hijerarhijskim karakteristikama, koriste se za modeliranje složenih sistema i imaju mogućnost da grafički predstavljaju model.

U literaturi se mogu naći radovi koji opisuju analizu različitih železničkih sistema primenjujući teoriju Petrijevih mreža. Basten predstavlja simulacioni model za analizu sistema osiguranja i zavisnosti puteva vožnji koristeći obojene Petrijeve mreže u softveru *ExSpect* (Basten et al., 1995). Van der Alst predlaže intervalne vremenske obojene Petrijeve mreže za modeliranje i analizu železničkih stanica gde se kašnjenja vozova definiše gornjom i donjom granicom, tj. intervalom (Van Der Aalst i Odijk, 1995). Damen je razvio model obojenih Petrijevih mreža da bi identifikovao konflikte trasa vozova i proračunao sekundarna kašnjenja (Daamen et al., 2009).

Rasputnice su mesta na otvorenoj pruzi na kojima se spajaju/razdvajaju i presecaju putevi vožnji vozova. Zbog toga, na rasputnicama neki vozovi mogu da utiču na saobraćaj drugih vozova. Ovo se najčešće dešava kada neki od vozova saobraća sa kašnjenjem. Primarno kašnjenje nekog voza može se preneti na druge vozove izazivajući sekundarna kašnjenja. Primarna kašnjenja su kašnjenja vozova prouzrokovana spoljnim stohastičkim poremećajima. Kada se primarna kašnjenja dogode unutar posmatrane mreže ona se nazivaju i originalna izvorna kašnjenja (*original delays*). Ako su dodatna vremena između dve trase voza manja od dužine primarnog kašnjenja, kašnjenje se prenosi na ostale vozove. Primarno kašnjenje jednog voza može prouzrokovati kašnjenja drugih vozova i stvoriti sekundarna kašnjenja (*knock-on ili secondary delays*). Veoma je teško proračunati i prognozirati sekundarna kašnjenja jer ona zavise od dužine primarnih kašnjenja, reda vožnje vozova i infrastrukture (jednokolosečna ili dvokolosečna pruga, kolosečne šeme stanice i signalno-sigurnosnih sistema) (Hansen, 2010). Uzrok primarnih kašnjenja mogu biti tehnički kvarovi, vožnje vozova sa smanjenom brzinom, produžena potrebna vremena za operacije sa putnicima, loši vremenski uslovi i ostali eksterni faktori (Goverde, 2010). Raspodele primarnih kašnjenja mogu se dobiti statističkom analizom postojećih empirijskih podataka. Yuan je predložio analitički stohastički model propagacije kašnjenja u stanicama za proračun sekundarnih kašnjenja (Yuan i Hansen, 2007). Tri najčešća pristupa za utvrđivanje kašnjenja vozova koja se pojavljuju u literaturi (Mattsson, 2007) su: analitičke metode, metode mikrosimulacije i statističke analize zasnovane na empirijskim podacima. Statistička analiza se najčešće koristi za modeliranje pojave primarnih kašnjenja, gde se utvrđuje kojoj teorijskom raspodelom verovatnoća se može opisati kašnjenje. Ovo se može primeniti u sistemima koji

funkcionišu u stabilnim uslovima. U sistemima gde postoje mnogi mogući uzroci poremećaja i gde je relativno visoka verovatnoća da spoljašnji faktori izazovu primarna kašnjenja, teško je pronaći zavisnost kojom bi se opisala i proračunala kašnjenja vozova.

U sistemu Železnica Srbije, stastička analiza dolaznih kašnjenja vozova u stanicama Rakovica i Novi Beogradu pokazuje da mnogi faktori utiču na kašnjenje vozova i da se u sistemu pojavljuju veliki poremećaji. Analiza saobraćajnih uslova i podataka prikupljenih za vreme sprovedenog istraživanja pokazuju da bi trebalo razmotriti sledeće parametre koje imaju uticaj na kašnjenje vozova: prioritet (kategorija) voza, vreme dolaska u stanicu, predjeni put voza, i uticaj infrastrukture na saobraćaj voza. Uporedna analiza statističkih metoda i metoda računarske inteligencije u proračunu kašnjenja vozova pokazuje jasne prednosti pristupa u kojem se koriste tehnike fazi logike, neuronskih mreža i adaptivnih neuro-fazi sistema. Fazi logika je matematički alat koji može da se koristi za modeliranje saobraćajnih procesa koje odlikuje subjektivnost, dvoznačnost i nepreciznost (*Teodorovic, 1999, Teodorović, 1998*). Fej je koristio fazi logiku za modeliranje sistema za podršku odlučivanja za dispečere vozova (*Fay, 2000*). Model, definisan kao fazi Petrijeva mreža, kombinuje ekspertske znanje fazi sistema i grafičke prednosti Petrijevih mreža, što ga čini pogodnim za kreiranje, testiranje, unapređivanje i održavanje. Čeng predlaže model fazi Petrijevih mreža koji koristi ekspertske znanje dispečera za definisanje baze podataka pravila za upravljenje sistemom saobraćaja vozova u slučaju poremećaja (*Cheng i Yang, 2009*).

U disertaciji je razvijeno nekoliko pristupa modeliranju kašnjenja vozova u sistemima Železnica Srbije. Prvi pristup je definisan za slučaj kada ne postoje statistički podaci o kretanju vozova u sistemu. Kao i kod većine tehničkih sistema, rešenje problema može se naći primenom znanja i iskustva stručnjaka koji su uključeni u tu problematiku u dužem vremenskom periodu. Modeli fazi logike, koji se koriste za proračun kašnjenja, uzimaju u obzir stručnost, iskustvo i znanje železničkog osoblja koje direktno učestvuje u regulisanju saobraćaja u sistemu. Podaci dobijeni anketiranjem osoblja i iz redova vožnji koriste se za definisanje parametara fazi sistema u modulima fazi Petrijevih mreža.

Drugi pristup definisan je za slučaj kada su dostupni podaci o prethodnim kašnjenjima vozova u sistemu, kao i ostali podaci o kretanju vozova. Podaci se mogu uzeti iz saobraćajnog dnevnika S-14 ili iz elektronskih baza podataka uređaja koji detektuju kretanje vozova. Podaci se koriste za obuku neuronskih mreža i adaptivnih neuro-fazi sistema. Kada se izvrši verifikacija rezultata, replika modela izrađuje se u modulu fazi Petrijeve mreže. Modul fazi Petrijeve mreže u modelu Petrijevih mreža rasputnice generiše primarna kašnjenja koja u kombinaciji sa podacima o dolascima vozova po redu vožnje daju vremena dolazaka vozova. Vreme dolaska, podaci o vozu i podaci o infrastrukturi su ulazni podaci u simulacioni model Petrijevih mreža. Model rasputnice sastoji se od povezanih modula koji predstavljaju određene tipove izolovanih odseka, a koji su međusobno povezani po planu odseka sistema rasputnice. Rezultati simulacionog modela verifikovani su animacijom zauzetosti pružnih i staničnih odseka i grafički, dijagramom saobraćaja vozova.

Disertacija je organizovana u devet poglavlja.

Prvo poglavlje je uvodno. Predstavljen je pojam rasputnice i ukazano je na posledice koje sistemi rasputnice mogu da izazovu u saobraćaju vozova. Predstavljen je povod za izbor navedene teme kao i motivi istraživanja. Ukazano je na potrebu da se pri modeliranju složenih sistema rasputnice mora uzeti u obzir i kašnjenje vozova. Nakon detaljne analize postojeće literature i modela koji su primenjivani na rešavanje sličnih problema, predlaže se primena simulacionog modeliranja, kao efikasnog alata za modeliranje i analizu sistema sa rasputnicom. Predloženi pristup simulacionog modeliranja zasniva se na teoriji Petrijevih mreža (Petri Nets).

Drugo poglavlje opisuje sisteme rasputnice. Dati su opisi i šematski prikazi raznih infrastrukturnih rešenja rasputnica na jednokolosečnim i dvokolosečnim prugama. Ukazano je na posledice koje različita rešenja rasputnica mogu da izazovu kod organizacije saobraćaja vozova.

U **trećem poglavlju** prikazane su osnove teorija modeliranja kao i mogućnosti, podele i načini modeliranja sistema. Razmatra se osnovni koncept simulacije, načini simulacije sistema, vrste simulacionih modela, vreme u simulacionim modelima kao i prednosti i nedostaci simulacionog modeliranja. Analizirane su osnove postojećih simulacionih programskih paketa koji se koriste za simulaciju saobraćaja vozova.

Definišu se karakteristike i mogućnosti koje bi simulacioni model rasputnice morao da ima.

Četvrto poglavlje disertacije posvećeno je teoriji Petrijevih mreža. Date su definicije Petrijevih mreža i Petrijevih mreža visokog nivoa (High-Level Petri Nets - HLPN). Prikazane su osobine Petrijevih mreža i njihove prednosti u modeliranju složenih diskretnih konkurentnih sistema. Posebno su predstavljene obojene, vremenske i fazi Petrijeve mreže.

U **petom poglavlju** prikazani su rezultati istraživanja kašnjenja vozova i predloženi su modeli za prognozu kašnjenja vozova koji su zasnovani na metodama računarske inteligencije. Istraživanja kašnjenja vozova sprovedena su na dve stanice u beogradskom železničkom čvoru u periodu od januara 2010. do juna 2012. godine. Definisana su tri modela kašnjenja vozova koja bi se primenjivali u zavisnosti od raspoložih podataka o ponašanju kretanja vozova u sistemu u prethodnom periodu. Kada postoje statistički podaci o kašnjenju vozova, predlože se model zasnovan na veštačkim neuronskim mrežama i model zasnovan na adaptivnim neuro-fazi sistemima. Za slučaj kada nisu poznati podaci o prethodnom ponašanju sistema, predložen je fazi logički model u kojem su ugrađena znanje i iskustva eksperata (otpravnika vozova i dispečera) o kašnjenju vozova. Rezultati dobijeni primenom modela računarske inteligencije upoređeni su sa rezultatima dobijenim modelom višestruke linearne regresije. Statistička uporedna analiza pokazala je da su modeli računarske inteligencije dali bolje rezultate. Neparometerski testovi su pokazali da nema osnova odbaciti hipotezu da se rezultati modela računarske inteligencije slažu sa empirijskim podacima.

Simulacioni model Petrijevih mreža saobraćaja vozova predstavljen je u **šestom poglavlju**. U konceptu izrade modela Petrijevih mreža predloženo je da se *tokenima* predstavljaju vozovi, a da se *mestima* predstavljaju odseci sistema rasputnice. Zbog potrebe da se definišu različite kategorije vozova, koristi se obojena Petrijeva mreža, odnosno mogućnost u HLPN da se tokeni definišu po bojama, tj. po karakteristikama. Predloženo je da se za pristup modeliranju sistema odabere izrada modula koji predstavljaju različite tipove izolovanih odseka u modelu sistema rasputnice. Na taj način, omogućava se primena modela za simuliranje železničkih sistema koji su zasnovani na konceptu praćenja kretanja vozova preko zauzetosti odseka vozovima. Izrada modela zasniva se na povezivanju unapred definisanih modula – podsistema

Petrijevih mreža, u formacije kojima se predstavlja plan odseka dela železničke mreže koja se modelira i povezivanje entiteta koji predstavljaju mesta gde se skladište podaci o sistemu. Prikazani su način povezivanja modula u modelu, kao i definisanje procesora da bi se modeliralo kretanje vozova. U modelu su definisane funkcije, tipovi i procesori, kao i podsistemi kojima se definišu različiti tipovi odseka i uslovi za ostvarenje prelaza. Nakon povezivanja modula i entiteta, model se kompletira definisanjem baza podataka iz kojih se u toku simulacije preuzimaju ulazni podaci o sistemu, kao i baza izlaznih podataka u koje se upisuju vrednosti obojenih tokena i skladišta koji se prikupljaju tokom izvršenja simulacije. Dat je i prikaz načina definisanja tipova, funkcija, sistema-modula i procesora u kojima se definišu uslovi prelaza tokena/vozova. Za potrebe proračuna primarnih kašnjenja vozova koriste se predloženi modeli zasnovani na metodama računarske inteligencije. Primarno kašnjenje vozova proračunava se u ulaznom modulu gde su fazi Petrijevom mrežom predstavljeni prethodno definisani modeli kašnjenja. Verifikacija i validacija simulacionog modela ostvarena je pomoću animacije kretanja tokena kroz model (kroz sistem modula) i praćenja zauzetosti odseka preko pokazivača stanja skladišta. Uz to, rezultati se u toku izvršenja simulacije ubacuju u bazu podataka, gde se ti podaci mogu lako filtrirati, statistički obraditi i grafički prezentovati. Razvijen je i postupak generisanja grafikona realizovanog saobraćaja vozova. Pomoću animacije stanja zauzetosti koloseka i grafičkog prikaza kretanja voza (grafikon vožnje vozova po odsecima modela) moguće je izvršiti validaciju i verifikaciju modela rasputnice.

U **sedmom poglavlju** prikazana je primena definisanog modela Petrijevih mreža na primeru odabrane rasputnice u beogradskom železničkom čvoru. Rasputnica „G“ nalazi se na dvokolosečnoj pruzi između stanica Rakovica, Beograd Centar, Topčider i Karađorđev Park. Ulazni podaci za izradu modela su: red vožnje vozova, podaci o dužinama i rasporedu odseka, položaji signala i brzine kretanja različitih kategorija vozova i td. Model Petrijevih mreža rasputnice „G“ izrađen je povezivanjem modula odseka u skladu sa planom odseka sistema rasputnice. Nakon toga, definisana je baza izlaznih podataka, prozor za animaciju zauzetosti odseka i makroi za crtanje grafikona saobraćaja vozova.

U **osmom poglavlju** predstavljeni su rezultati modela. Rezultati su predstavljeni za dva primera primene modela, kod operativnog (taktičkog) i strateškog planiranja

sistema rasputnice. Kod primene u operativnom planiranju, model se koristi za dobijanje podataka o kretanju vozova, nastanku sekundarnih kašnjenja, kao i zauzetosti i iskorišćenju odseka. Kao primer primene u strateškom odlučivanju, model je izrađen za tri različite varijante infrastrukturnog rešenja rasputnice. Dobijeni rezultati su upoređeni i na osnovu njih predloženo je optimalno infrastrukturno rešenje rasputnice u funkciji prognoziranog broja vozova u sistemu.

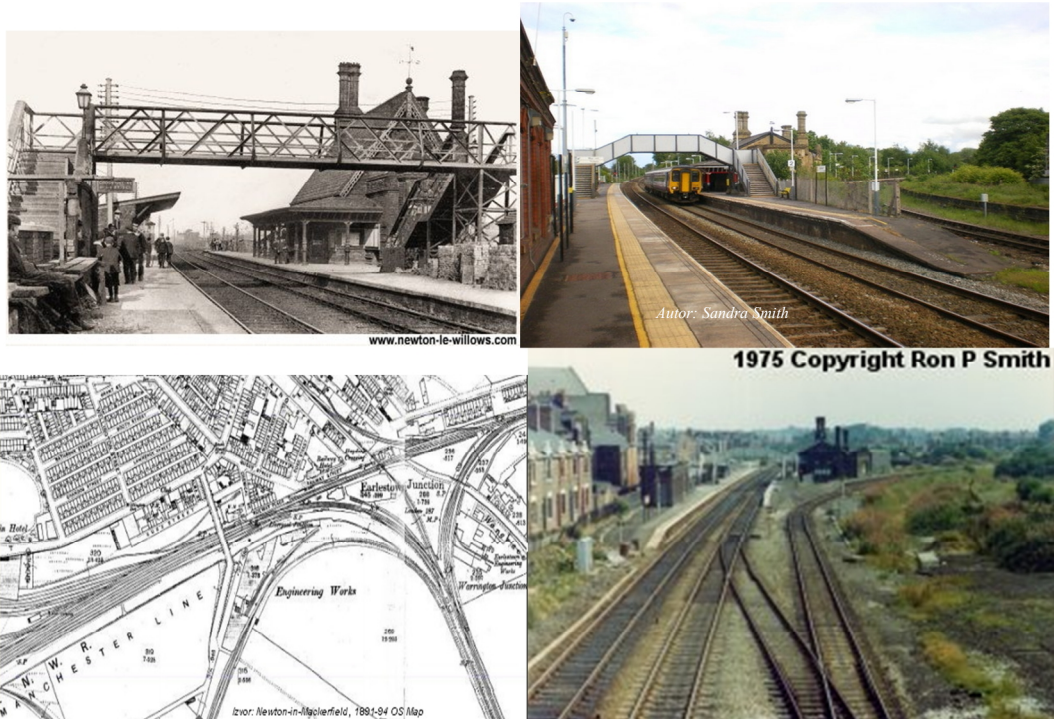
U poslednjem **devetom poglavlju** data su zaključna razmatranja u skladu sa dobijenim rezultatima modela. Zaključci su dati u formi opštih i posebnih zaključaka i odnose se na predloženu primenu Petrijevih mreža u simulacionom modeliranju složenih sistema saobraćaja vozova. Na kraju, date su smernice koje se odnose na dalja istraživanja u ovoj oblasti.

2 RASPUTNICE

2.1 UVOD

Rasputnice su službena mesta na otvorenoj pruzi na kojima se dve pruge spajaju, što znači da postoji fizička veza između pruga koja je ostvarena pomoću skretnica.

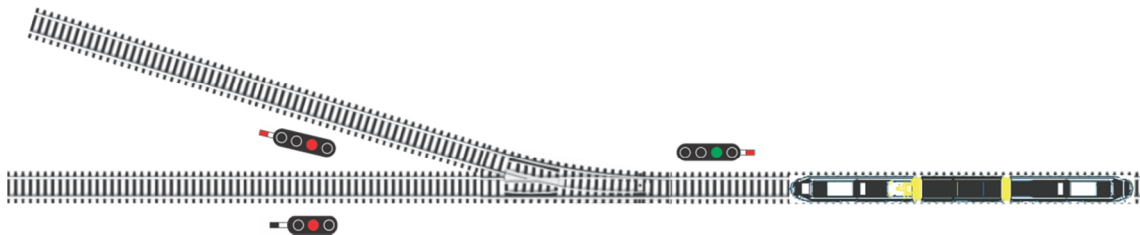
Prva rasputnica na svetu (za parnu vuču), rasputnica Njutn (*Newton Junction*), izgrađena je u Engleskoj u mestu *Newton* (danas *Earlestown*) na pruzi Liverpool – Mančester, a otvorena je za saobraćaj 15. septembra 1830. godine (Slika 2.1). Pruga Varington – Njutn otvorena je za putnički saobraćaj 25. jula 1831. godine i spojena je sa postojećom prugom u gradiću Njutn, sa smerom ka Liverpulu. Rasputnica je imala veoma male poluprečnike krivina, što je izazivalo probleme i zahtevalo ograničenj brzina vozova. Godine 1837. izgrađena je veza koja je omogućavala vožnju vozova za Mančester. Tako je rasputnica dobila oblik triangle, a sama stanica je jedna od retkih koja ima oblik triangle sa šest perona. Interesantno je da je to do danas najstarija stanica na svetu koja se nalazi na istom mestu na kom je i izgrađena (*wikipedia: Earlestown railway station*).



Slika 2.1 Prva rasputnica na pruzi sa parnom vučom u Erlstounu u Engleskoj

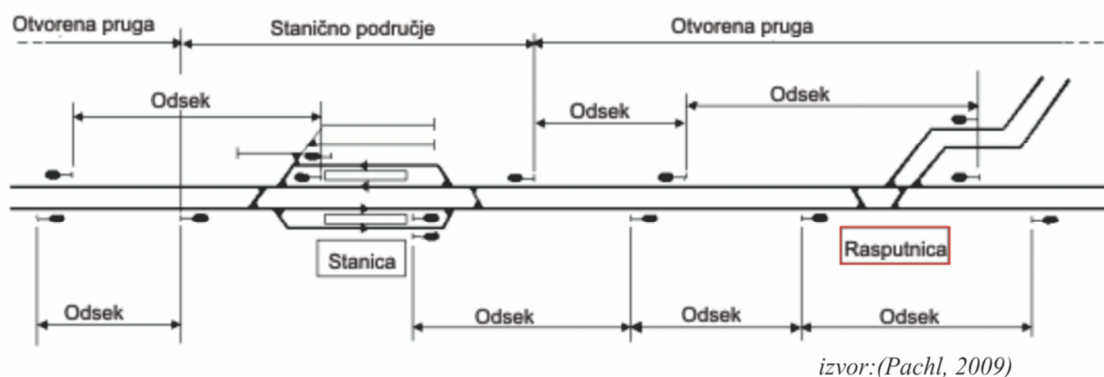
2.2 POJAM I DEFINICIJA RASPUTNICE

Rasputnica je službeno mesto gde se sa otvorene pruge odvaja druga pruga (Slika 2.2 i 2.3 (Pachl, 2009)). Od tehničkih sredstava na jednokolosečnoj pruzi ima bar jednu skretnicu, signalno-sigurnosna postrojenja za osiguranje rasputnice i sredstva veze.



Slika 2.2 Linijski prikaz rasputnice na jednokolosečnoj pruzi

Rasputnice su službena mesta na kojima dolazi do povećane ugroženosti saobraćaja jer se nalaze na otvorenom delu pruge gde se presecaju putevi vožnji vozova. Zbog toga, neophodno je dobro osigurati rasputnicu i organizovati saobraćaj vozova tako da ne dođe do ugrožavanja bezbednosti.



Slika 2.3 Šematski prikaz rasputnice na dvokolosečnoj pruzi

Rasputnica omogućava vozovima da prelaze sa jedne pruge na drugu (odvojnu) prugu. Organizacija kretanja vozova preko rasputnice i upravljanje vozovima vrši se iz neke od susjednih stanica. Rasputnice izazivaju čitav niz negativnih efekata kao što su smanjenje propusne moći pruge, zaustavljanje i zadržavanje vozova.

Karakteristike kojima može da se opiše rasputnica su:

- 1) položaj na pruzi (lokacija),
- 2) tipovi i karakteristike skretnica koje su upotrebljene za formiranje rasputnice,
- 3) položaj signala kojima je osigurana rasputnica,
- 4) mogućnosti formiranja puteva vožnje vozova s obzirom na način povezivanja pruga, osiguranje rasputnice i postojanje slepih štitnih koloseka (izvlačnjaka) koji bi omogućili istovremene puteve vožnje preko rasputnice,
- 5) način organizacije saobraćaja vozova preko rasputnice (sleđenje vozova u blokovnom razmaku, staničnom razmaku, pri automatskom pružnom bloku (APB) itd.).

Parametri rasputnice pomoću kojih može da se sagleda rad rasputnice i njen uticaj na saobraćaj vozova su:

- procenat ukupne i fizičke zauzetosti odseka rasputnice i susjednih blokovnih odseka,
- broj vozova koji može da se propusti preko rasputnice u datom periodu vremena,
- broj vozova i njihovo vreme zadržavanja na zaštitnim signalima rasputnice,
- broj vozova i vreme zadržavanja vozova na drugim delovima sistema, a koji su pod uticajem regulisanja saobraćaja preko rasputnice (konflikti vozova na rasputnici).

U slučaju većeg broja vozova koji saobraćaju preko rasputnice, može doći do zadržavanja i kašnjenja vozova. Da bi se povećala propusna moć rasputnice i smanjilo

kašnjenje vozova, moraju se poboljšati parametri rasputnice, a neke od mera za to bi bile:

- promena načina organizacije saobraćaja vozova na delu pruge gde postoji rasputnica (npr. uvođenjem optimalnog rasporeda prostornih odseka) ,
- uvođenje novih infrastrukturnih rešenja (bolje veze koloseka, skretnice koje omogućavaju veću brzinu kretanja vozova preko rasputnice, izgradnja štitnih koloseka, promena načina osiguranja i td.),

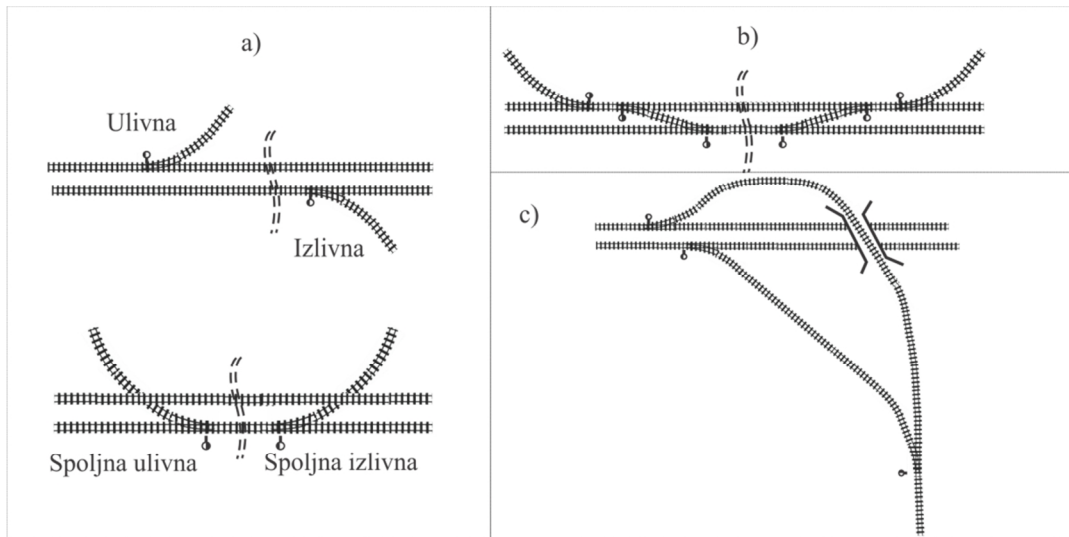
Kada su iscrpljene sve tehničko-tehnološke i organizacione mogućnosti za poboljšanje propusne moći pruge sa rasputnicom, sledeća mera je izgradnja novih rešenja koja se zasnivaju na konceptu denivelisanja pruga. To se postiže denivelacijom koloseka ili izgradnjom nove pruge. Kod denivelisanja rasputnice (engl. *flying junction*, *grade-separated junction*) uvođenje koloseka u stanicu rešava se ukrštavanjem u različitom nivou. Složeni sistemi rasputnica koriste se kada je neophodno omogućiti bolju propusnu moć i mogućnost prelaza sa jedne na drugu prugu. Triangla (engl. *triangle*, *wye*) je takva infrastrukturno postrojenje gde su koloseci postavljeni tako da formiraju trougao, a fizička veza između koloseka ostvarena je skretnicama koje se nalaze u temenima zamišljenog trougla. U Evropi i kod nas postoje primeri triangli koje su se gradile zbog potrebe da se okreću lokomotive, ali i celi vozovi, kao i da se omoguće obostrani direktni prelasci sa glavne pruge, iz oba smera, na odvojnu prugu i obrnuto. Danas, ne postoji potreba za okretanjem vozila, a zemljište koji se nalazi unutar triangle je upotrebljivo za sopstvene potrebe železnice. Međutim, postoji potreba lakšeg i bržeg „usmerenog“ kretanja vozova sa glavne na sporednu prugu i obrnuto.

2.3 TIPOVI RASPUTNICA

Sistem rasputnica na dvokolosečnoj pruzi je sistem gde se sa dvokolosečne pruge odvajaju druga pruga. Jedna od pruga smatra se osnovnom i po njoj se vozovi kreću normalnom brzinom, dok se vozovi koji ka odvojnoj pruzi preko sistema rasputnica kreću brzinom koja zavisi od tehničkih karakteristika skretnica. Kada se dve pruge spajaju, pored dve skretnice, postoji i mesto na kojem se vozu omogućava da pređe preko drugog koloseka. To se može rešiti ugradnjom još jedne skretnice, ukrsne skretnice ili ukrštajem.

Kod sistema rasputnica gde postoji prelaz sa dvokolosečne pruge na jednokolosečnu, mogu se primeniti sledeća rešenja (Slika 2.4):

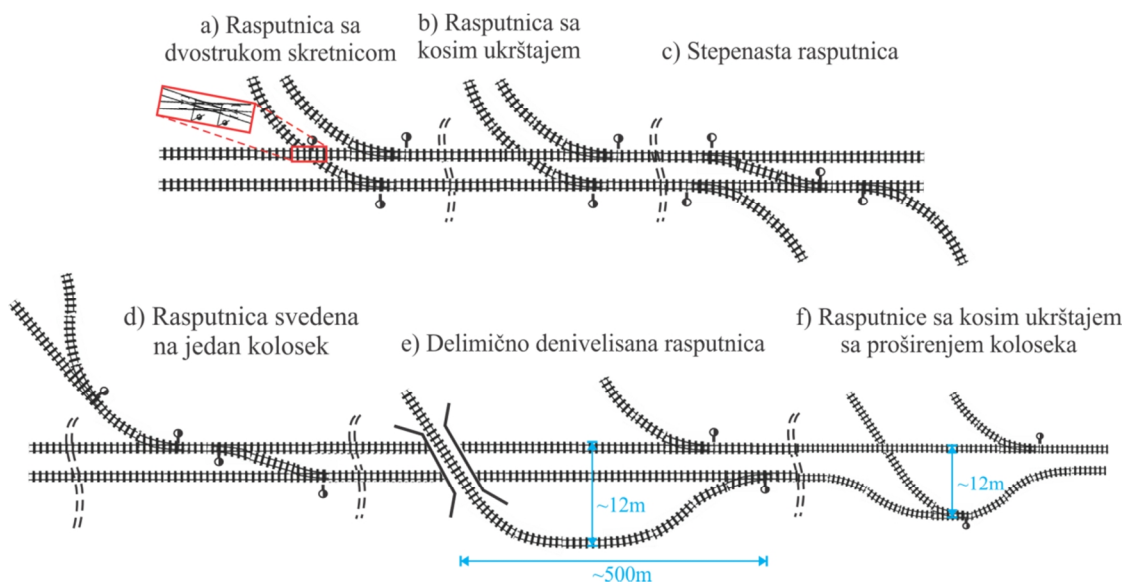
- rasputnice na jednom koloseku sa jednom skretnicom i rasputnice na jednom koloseku sa jednom skretnicom i jednim ukrštajem;
- rasputnice na oba koloseku sa po jednom skretnicom na svakom koloseku;
- rasputnice na dva koloseka sa tri skretnice.



Slika 2.4 Šeme rasputnica za povezivanje jednokolosečne i dvokolosečne pruge

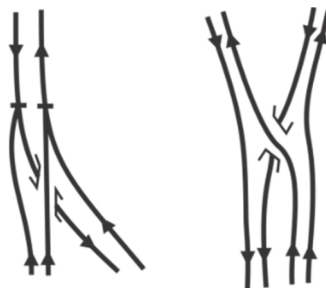
Rasputnice koje povezuju dvokolosečne pruge mogu se podeliti na (Slika 2.5) :

- rasputnica sa dvostrukom skretnicom (ukrsne dvopostavne skretnice); fiksni ukrštaj može se zameniti sa dvojnoukrsnom („engleskom“) skretnicom.
- rasputnica sa ukrštajem; najjednostavniji i najčešći oblik sa dve skretnice i jednim ukrštajem.
- pomerene („stepenaste“) rasputnice; kod ovih rasputnica ukrštaj je zamenjen skretnicama.
- jednokolosečno svedene rasputnice.
- delimično denivelisane rasputnice; koloseci se mogu fizički odvojiti tako da ne postoji spajanje koloseka u nivou što dovodi do povećanja propusne moći pruga i smanjenja kašnjenja vozova. Denivelisanje koloseka ne može se uvek izvesti jer zahteva dosta prostora i po dužini i po širini trase pruge.
- Rasputnice sa ukrštajem sa proširenjem koloseka; proširenjem koloseka omogućava se povećanje brzine preko ukrštaja.



Slika 2.5 Šeme rasputnica za povezivanje dvokolosečnih pruga

Rešenje rasputnice, odnosno šema povezivanja koloseka na rasputnici, nije uvek unapred definisano i tipizirano, već zavisi od lokacije na kojoj se nalazi rasputnica, kao i od broja i trasa pruga (koloseka) koji se spajaju (Kornakov, 1962) (Slika 2.6).



Slika 2.6 Rešenja rasputnice za različiti broj koloseka

Saobraćajni procesi kao i način organizacije i upravljanja saobraćajem vozova u sistemima rasputnice su veoma složeni. Kretanje vozova preko odseka rasputnice uslovljeno je brojnim ograničenjima koja se moraju ispuniti da bi se saobraćaj preko rasputnice odvijao bezbedno. U prostim sistemima jednokolosečnih pruga saobraćaj vozova odvija se u odjavnom razmaku (Slika 2.2). Kod složenih rešenja rasputnice sa više koloseka, način odvijanja saobraćaja zavisi od vrste sistema rasputnice, ali i od načina osiguranja rasputnice, položaja zaštitnih signala, itd. Kod kompleksnih sistema

rasputnica na dvokolosečnim prugama, sistemi rasputnice mogu biti toliko složeni da je nekad neophodno izmeniti način saobraćaja vozova i osiguranja na tom delu pruge da bi se ispunila ograničenja koja nameće rasputnica. Zbog toga, rasputnice imaju veliki uticaj na organizaciju saobraćaja vozova, a samim tim i na propusnu moć pruge i kašnjenje vozova.

2.4 PROPUSNA MOĆ PRUGE I ORGANIZACIJA SAOBRAĆAJA VOZOVA NA RASPUTNICI

Svako čvorno mesto na pruzi je najčešće i mesto presecanja železničkih pruga. Složena čvorna mesta koriste postrojenja koja imaju za cilj da omoguće prelazak vozova sa jedne na drugu prugu. Postrojenja za vezu koloseka omogućavaju da vozovi prelaze sa jedne pruge na drugu (skretnice na rasputnici) ili da ostanu na istom koloseku (ukrštaji). Na otvorenoj pruzi postoji potreba da se presecaju pruge da bi se ostvarile sve potrebne veze između pruga na prilazima stanicama. Koncept rasputnica u određenoj meri zavisi od sledećih faktora:

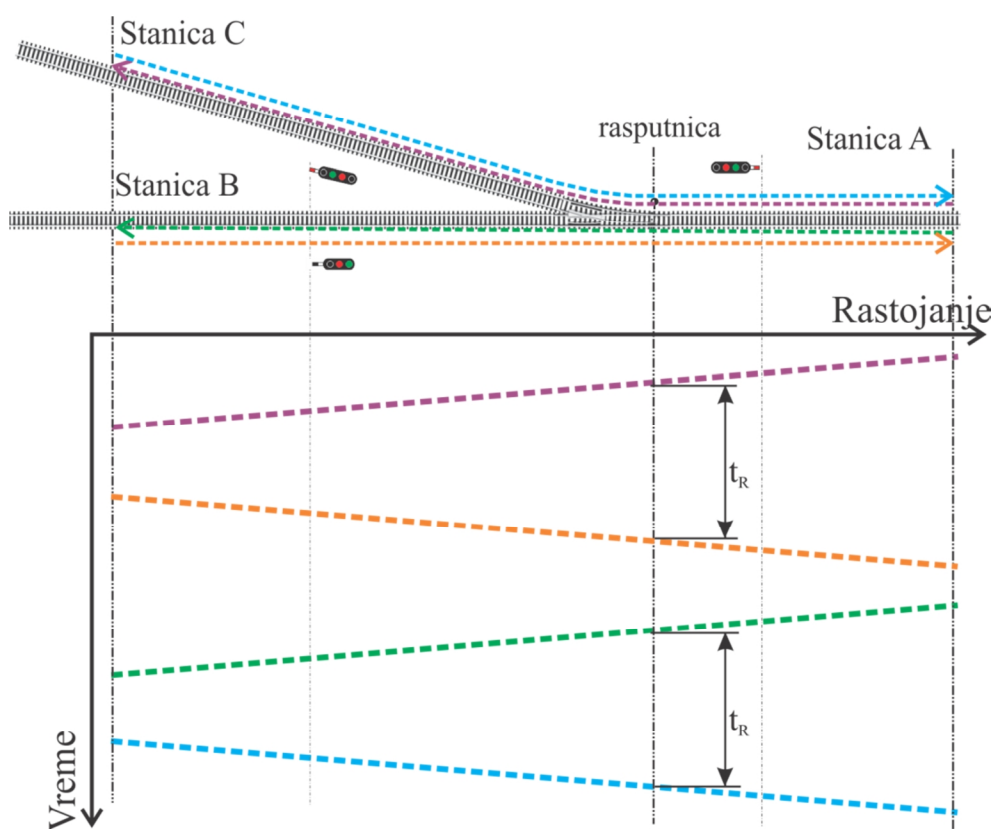
- broja osnovnih pravaca na pojedinim prugama,
- mogućnosti postojanja rasputnica i raskrsnica u nivou,
- geometrijske šeme čvora,
- međusobnog položaja stanica u čvoru i njihove namene i veličine,
- postojeći uslovi konfiguracije terena i položaj pruga u planu i profilu.

Podela rasputnica u zavisnosti od položaja u vertikalnoj ravni je na one koje su u nivou i na one koje su denivelisane. Mesta ukrštanja pruga u nivou imaju takvu šemu gde su koloseci povezani postrojenjima za promenu koloseka (skretnicama), a kod denivelisanih rešenja ne postoji fizička veza i koloseci nisu u istom nivou u tačkama presecanja. Ukrštanja koloseka u istom nivou najčešće se koriste u čvorovima i stanicama gde postoji relativno mali broj vožnji vozova. Oni ne mogu da obezbede nezavisnost puteva vožnje na svakoj dolaznoj pruzi u čvoru i dodatno zahtevaju formiranje puteva vožnji po više koloseka. Ipak, ukrštanje ili sastavljanje trasa pruga u nivou na ravnom terenu je često primenjivano rešenje, jer su obično troškovi izgradnje

ovakvih čvorova mali, a primena postojećih modernih signalno-sigurnosnih uređaja omogućava dovoljne garancije za bezbedno kretanje vozova kroz čvor.

2.4.1 RASPUTNICE NA JEDNOKOLOSEČNIM PRUGAMA

Najjednostavniji tip ukrštanja dve pruge u nivou je rasputnica ili raskrsnica na jednokolosečnoj pruzi. Bezbednost saobraćaja vozova preko rasputnice obezbeđena je odgovarajućim zaštitnim signalima i u nekim slučajevima zaštitnim slepim kolosecima. Pri izradi grafikona saobraćaja vozova interval prelaska vozova na rasputnici posebno se izračunava za svaku rasputnicu na pruzi. Intervali prelaska su norme za izvršenje odgovarajućih radnji koje se ugrađuju u grafikon, a predstavljaju vremenske razlike između vozova koje su merodavne za rasputnicu kao službeno mesto na pruzi. Interval prelaska vozova na rasputnicima obuhvata vreme od trenutka prolaska jednog voza glavnom prugom ili prelaska na odvojnu prugu do trenutka prelaska voza suprotnog smera sa odvojne ili glavne pruge preko rasputnice (Slika 2.7).



Slika 2.7 Intervali prelaska vozova na rasputnicama

Na Slici 2.7 predstavljene su dve kombinacije redosleda saobraćaja vozova. Interval prelaska vozova preko rasputnice t_R računa se po obrascu:

$$t_R = t_{sp} + t_{pr} \text{ (min)}, \quad (2.1)$$

gde je:

t_{sp} - vreme sporazumevanja otpravnika vozova i skretničara i potrebne radnje za osiguravanje puta vožnje suprotnog voza. To je vreme od prolaska ukrasnog voza pa do mogućnosti postavljanja ulaznog signala i predsignala za slobodnu vožnju suprotnom vozu. Kako zbog obezbeđenja kontinuiranog saobraćaja suprotni voz ne sme stati pred signalom, to se on može nalaziti najmanje na daljini vidljivosti predsignala;

t_{pr} - potrebno vreme za prolazak voza koji se u trenutku postavljanja signala može nalaziti na daljini vidljivosti predsignala.

Vreme t_{pr} može se odrediti na osnovu izraza (Slika 2.8):

$$t_{pr} = \frac{0,06}{V_{sr}} (l_V + l_{zs} + l_p + l_{sig} + l_R) \text{ (min)}, \quad (2.2)$$

gde je:

V_{sr} - srednja brzina voza (km/h) od trenutka zapažanja predsignala do njegovog prolaska,

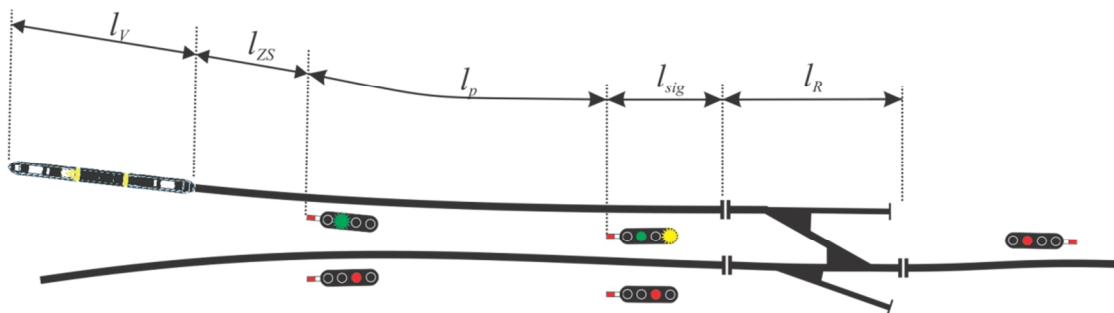
l_V - dužina voza u metrima,

l_{zs} - propisana daljina vidljivosti (zapažanja) signala koja se određuje prema maksimalnoj brzini voza, u (m)

l_p - udaljenost od predsignala do zaštitnog signala rasputnice, u (m)

l_{sig} - udaljenost od zaštitnog signala do skretnice u (m) i

l_R - dužina rasputnice (dužina izolovanog odseka rasputnice) u (m).



Slika 2.8 Elementi za proračun vremena prolaska voza na rasputnici

Koristeći podatke za proračun vremena vožnje preko rasputnice iz izraza (2.1) u Tabeli 2.1 (Kornakov, 1962) date su vrednosti intervala prelaska vozova preko rasputnice za različite ulazne podatke (brzina vožnje voza) po tipu osiguranja.

Tabela 2.1 Proračunate vrednosti intervala prelaska preko rasputnice

Srednja brzina (km/h)	Vreme zauzetosti (u min)	
	Elektrorelejno osiguranje	Mehaničko osiguranje
20	10,7	11,2
30	7,5	8,0
40	5,9	6,4
50	5,0	5,5
60	4,3	4,8
70	3,9	4,4

Kao službena mesta na otvorenoj pruži, rasputnice utiču na saobraćaj vozova i ograničavaju propusnu moć deonice. Propusna moć rasputnice, N , definisana je kao odnos ukupnog raspoloživog vremena u toku dana (1440 minuta) i ukupnog vremena zauzetosti elementa rasputnice vozovima (vozovi ili pari vozova) - T_{zau} .

$$N = \frac{1440}{T_{zau}} \quad (2.3)$$

U slučaju kada se vozovi kreću u oba smera, na vreme zauzetosti elementa vozom t , treba dodati i vreme potrebno za pripremu službenog mesta za kretanje voza u drugom smeru τ .

$$N = \frac{1440}{t + \tau} \quad (2.4)$$

U proračunu zauzetosti elemenata rasputnice treba uzeti u obzir i različita vremena tj. brzine vozova, jer se mogu razlikovati pri kretanju vozova u različitim smerovima ili za različite kategorije vozova. Tako se prosečna zauzetost elemenata može uzeti kao srednja vrednost, ili se može koristiti i neka stohastička vrednost (na osnovu prethodnih snimanja na terenu). Proračun intervala odstupanja vremena vožnje zavisi od složenosti profila pruge, dužina odseka i od toga da li je pruga jednokolosečna ili dvokolosečna. Pored toga, propusna moć zavisi i od reda vožnje (redosleda vozova).

Propusna moć raskrsnice na jednokolosečnoj pruzi definisana je izrazom (Kornakov, 1962):

$$N_{AB}(t_{AB} + t_{BA}) + N_{AC}(t_{AC} + t_{CA}) \leq 1440(1 - \Delta t) - T_{dk} \quad (2.5)$$

gde je:

N_{AB} – broj pari vozova na pruzi A-B;

N_{AC} – broj pari vozova na pruzi A-C;

t_{AB}, t_{BA}, t_{AC} i t_{CA} - vreme vožnje voza na relaciji AB, BA, CD, DC;

T_{dk} – srednja vrednost dodatnog vremena kašnjenja vozova definisana Teorijom verovatnoće nakon analize kašnjenja vozova;

Δt – dodatno vreme za povećanje vremena zauzetosti rasputnice, zbog odstupanja od procenjenog vremena vožnje.

Propusna moć rasputnice sa Slike 2.8 zavisi od raspodele vozova po pravcima, brzine kretanja vozova i zavisi od načina osiguranja rasputnice. Kornakov (Kornakov, 1962) je u primeru raskrsnice gde su unapred definisani ulazni podaci, dao vezu između broja vozova po pravcima, n_1 i n_2 , i ukupne propusne moći raskrsnice, $\sum n$, (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 Propusna moć pruga u zavisnosti od broja vozova po pravcima

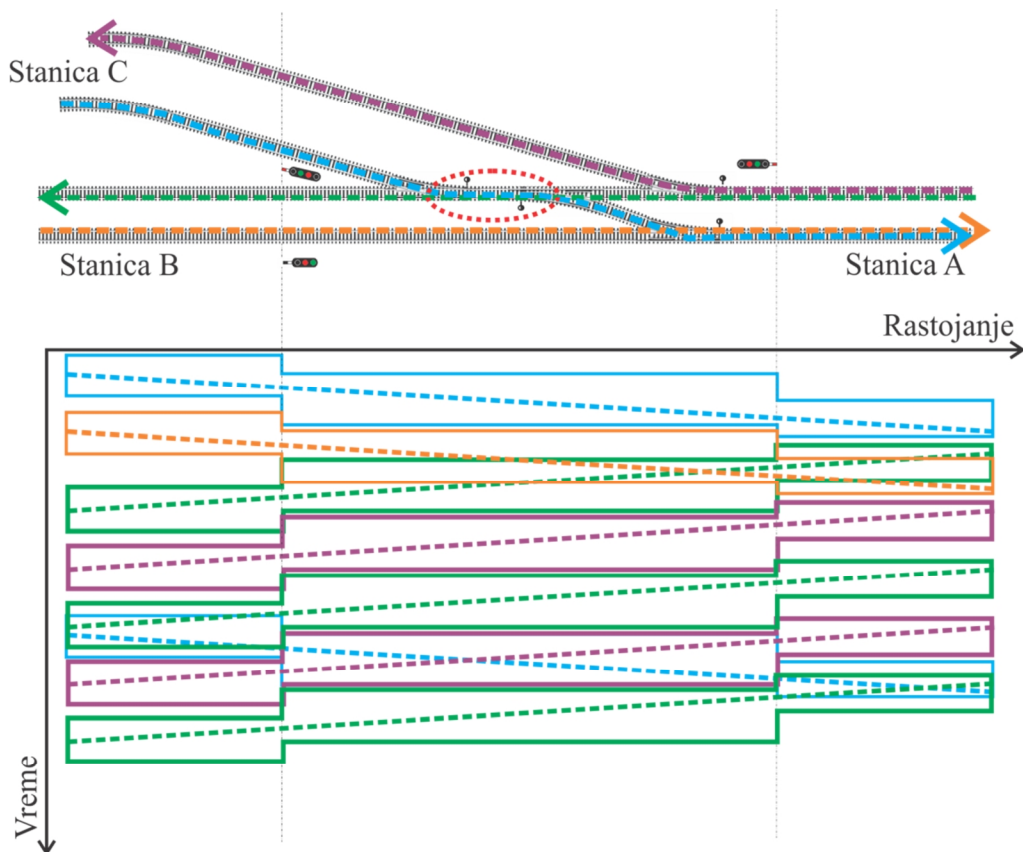
Sistem osiguranja	Pokazatelji propusne moći	Propusna moć (broj vozova) pri n_2									
		0	6	12	18	24	36	48	60	72	86
Poluautomatski	$n_1 = f_1(n_2)$	72	72	71	71	70	69	68	67	66	-
	$\sum n$	72	78	83	89	94	105	116	127	138	-
Automatski	$n_1 = f_2(n_2)$	115	113	111	108	106	102	98	94	90	86
	$\sum n$	115	119	123	126	130	138	146	154	162	172

Iz Tabele 2.2 može se videti da propusna moć raskrsnice raste (ukupan broj vozova) iako se broj vozova n_2 na drugom pravcu povećava. Interval sleđenja vozova na jednokolosečnoj pruzi ograničava broj vozova po pravcima, ali je veći od intervala prelaska preko raskrsnice što dovodi do povećanja ukupnog broja vozova. Ipak, ukupan broj vozova je znatno manji nego zbir broja vozova koji bi se mogli propustiti preko dve nezavisne jednokolosečne pruge.

2.4.2 RASPUTNICE NA DVOKOLOSEČNIM PRUGAMA

Kod složenih rasputnica propusna moć se ne može odrediti analitički već se moraju koristiti grafičke i simulacione tehnike. Približni analitički proračun može se dobiti dodavanjem privremene zauzetosti rasputnice svim vozovima.

Prilikom analize propusne moći na dvokolosečnim prugama, kao i kod stanica, sistem rasputnica potrebno je posmatrati zajedno sa odsecima oko rasputnice. Analizira se sama rasputnica, susedni odseci i signali i trase vozova koje imaju konflikte (Landex, 2008). Na primeru prikazanom na Slici 2.9 prikazane su razne kombinacije redosleda vozova koji saobraćaju između stanica A, B i C. Zaštitni signali rasputnice postavljeni su tako da omogućavaju istovremeno formiranje puteva vožnji vozova koji se međusobno ne ugrožavaju. Specifični uslovi organizacije saobraćaja vozova na rasputnici ograničavaju propusnu moć pruge.



Slika 2.9 Grafikon saobraćaja vozova preko rasputnice na dvokolosečnim prugama

Na osnovu grafikona saobraćaja vozova (Slika 2.9) može se zaključiti da propusna moć dela pruge najviše zavisi od dela pruge na kom se presecaju trase vozova, a koji spaja dve dvokolosečne pruge i sastoji se od skretničkih izolovanih odseka. Kod

varijante sleđenja vozova u smeru A-C i A-B, intervali sleđenja su isti kao i u slučaju da ne postoji rasputnica. Interval prelaska vozova preko rasputnice kod saobraćaja vozova A-B i C-A i u smeru B-A i C-A značajno utiče na saobraćaj vozova. Najveće ograničenje propusne moći na rasputnici izazivaju vozovi u smeru C-A čija trasa preseca trase vozova B-A i A-B. Kod rešenje rasputnice u kojem je denivelisan kolosek za vozove u smeru C-A (Slika 2.5e i 2.5f) ovo presecanje trasa ne postoji i propusna moć je veća. U tom slučaju, najveće ograničenje propusne moći je ulivna skretnica na kojoj bi se presecale trase C-A i B-C. Izlivna skretnica preko koje saobraćaju vozovi A-C i A-B ne donosi značajno ograničenje propusne moći jer je ona već ograničena intervalom sleđenja vozova iz stanice A.

2.5 REZIME

Rasputnice se zbog specifičnih uslova i pravila organizacije saobraćaja mogu posmatrati kao složeni sistemi. Pri tome, u analizu takvog sistema moraju se uključiti i susedne stanice i odseci. Takvi složeni sistemi ne mogu se precizno opisati analitičkim metodama. Analitičke metode kojima se određuju parametri sistema rasputnice su metode zasnovane na Teoriji sistema masovnog opsluživanja. Princip je da se svaki blokovni odsek u sistemu predstavi kao kanal opsluživanja i kao red čekanja za ulazak u sledeći odsek. Sistem je predstavljen kao niz povezanih kanala opsluživanja gde izlazni tok iz prethodnog odseka predstavlja ulazni tok u naredni odsek. Zbog velikog broja ograničenja koja se moraju ispuniti da bi se omogućilo kretanje voza, postoji mnogo uslova koji se nameću takvom sistemu masovnog opsluživanja. Primena metode Monte-Karlo može da pojednostavi primenu ovakvih modela jer bi se omogućilo da se ovakvi modeli kreiraju na računarima. Analiza rada sistema sa rasputnicom pomoću metoda za proračun propusnih moći pruga donekle je moguća, ali je proračun dosta složeniji nego kod otvorenih pruga i ne daje potpune parametre o radu rasputnice. Parametri koji najbolje opisuju uticaj rasputnice su broj vozova koji je zaustavljen i vreme kašnjenja svakog od vozova za dati red vožnje vozova. Te parametre ne možemo dobiti analitičkim metodama. Grafička metoda podrazumeva ucrtavanje trasa vozova koji se kreću kroz sistem rasputnice, a zatim očitavanje podataka sa grafikona i njihovu klasifikaciju i analizu. Ova metoda daje više podataka o

radu sistema rasputnice, ali oduzima previše vremena i ne može se automatizovati već zahteva da se proračuni rade pojedinačno za svaki sistem, za svaki red vožnje, itd.

Zbog složenosti saobraćajnih procesa koji se odvijaju u složenim sistemima rasputnice i velikog broja podataka koje je potrebno obraditi da bi se sistem opisao, veoma često se za njihovu analizu koriste tehnike simulacionog modeliranja. Simulacione metode imaju mogućnost da opišu sve zakonitosti i uslovljenosti koje se javljaju na rasputnici i tako formiran simulacioni model može se efikasno iskoristiti za dobijanje pokazatelja rada sistema sa rasputnicom (*Marković et al., 2000*). Pri primeni simulacionih metoda i kreiranju modela rasputnice treba voditi računa da se jasno sagledaju i predstave sve relacije između infrastrukture, voznih sredstava i reda vožnje. U tom smislu, treba voditi računa o realnosti pretpostvaki, granicama modela, nivou detalja (mikro ili makro simulacija), implementaciji svih pravila saobraćaja vozova, kao i o mogućnostima za predstavljanje stohastičkih pojava u sistemu.

3 SIMULACIJE U ŽELEZNIČKOM SAOBRAĆAJU

3.1 UVOD

Postoji četiri osnovne vrste simulacionih modela, koji se razlikuju, s jedne strane, po pristupu modeliranju i klasi problema koji se rešavaju, i s druge strane, po tehnikama modeliranja i simulacije koje su za njih razvijene. To su: Monte Karlo simulacija, kontinualna simulacija, simulacija diskretnih događaja i mešovita (kontinualno-diskretna) simulacija.

Simulaciono modeliranje i analiza su procesi kreiranja i eksperimentisanja sa kompjuterizovanim matematičkim modelom fizičkog (realnog) sistema, gde se sistem definiše kao skup interaktivnih delova koje dobijaju *ulaz* i daju *izlaz*. Često se mešaju pojmovi simulatora i simulacija. Simulacija se koristi za analiziranje sistema i kreiranje operativnih, razvojnih ili strateških odluka, dok se simulatori koriste za obuku korisnika, čime se postiže bolja obučenost i veći kvalitet korisnika.

Mogu se simulirati različiti sistemi kao što su sistemi proizvodnje, usluga ili saobraćaja i transporta. Neki od saobraćajnih i transportnih sistema koji se mogu simulirati su sistemi u aerodromima, lukama, sistemi distribucija robe i kretanje robe i vozila u drumskom i železničkom saobraćaju.

3.2 IZRADA SIMULACIONOG MODELA

Za kvalitet simulacionog modela presudan je kvalitet ulaznih podataka kao i to da verodostojno odslikava realan sistem, što se potvrđuje validacijom i verifikacijom. U postupku izrade simulacionog modela postoje neki postupci i procedure koji omogućavaju modelaru da efikasno dođe do kvalitetnih izlaznih rezultata. Prvi korak je najčešće odluka da li problem (posmatrani sistem) rešavati simulacijom. Ova odluka je veoma važna jer simulacija može biti jako skupa i može oduzeti puno vremena, a da pri tome ne daje optimalna rešenja već je samo alat za dobijanje ulaznih podataka za neki drugi model optimizacije. Najčešće je, kod prostih sistema, do rešenja moguće doći

analitičkim ili grafičkim metodama. Ipak, kod nekih specifičnih ili složenih sistema, simulacija je jedini način za analizu ponašanja sistema. Takođe, treba uzeti u obzir i prednost simulacije da se sistemi analiziraju u toku rada, bez zaustavljanja. Na taj način, računarska simulacija može dinamički da modelira sistem. Ako je simulacija neophodna, sledeći korak bio bi pronaći najbolji način za izradu simulacionog modela. Izrada simulacionog modela često zahteva specijalnu obuku. U prošlosti, bilo je jako teško izraditi simulacioni model, jer su svi modeli pisani u programskim jezicima sa editorom teksta (sa sledećim koracima: pisanje izvornog koda, kompajliranje, linkovanje i izvršavanje programa). Jedan zarez ili slovo koje nije na svom mestu dovoljan je da program prijavi grešku. Za ovakvo programiranje bilo je potrebno veoma dobro poznavanje programskog jezika, što je značilo da se time bavio samo mali broj ljudi. Napredak u računarskoj simulaciji osetio se nakon početka primene programa za simulaciju sa grafičkim interfejsom. Sistemi koji se modeliraju sada su složeniji, tako da modeli mogu biti kompleksni, a analitičari koji se bave modeliranjem moraju da imaju znanja i iz programiranja, računarstva, inženjerstva, matematike ili operacionih istraživanja. Kod savremenih programskih paketa, bez obzira na njihovu specifičnu namenu, ponekad razvijanje dobrog modela može trajati dosta dugo, a samim tim može biti i jako skupo. Čak i kada korisnik ima dobro znanje o softverskom paketu koji koristi, složeni sistem može oduzeti dosta vremena za prikupljanje podataka, razvijanje modela i analizu. Nakon izrade simulacionog modela jednaka pažnja mora se posvetiti i rezultatima simulacija koji mogu dati dosta podataka i zahtevaju određeno statističku obradu. Rezultati simulacija najčešće se dobijaju u vidu sumarnih statistika ili u vidu baza podataka sa rezultatima koji su ubacivani u bazu u toku izvršenja simulacije. U oba slučaja potrebno je da korisnik simulacionog modela ima neko znanje o matematičkoj statistici da bi mogao da razume i analizira dobijene rezultate. Rezultati dobijeni jednom simulacijom (jednim prolazom) nisu dovoljni za analizu. Sistemi koji se ponašaju po zakonima verovatnoće daće različite rezultate za svaku pojedinačnu simulaciju. Mogućnost da model simuliramo i analiziramo veliki broj puta omogućava nam da statistički ispitamo kvalitet dobijenih podataka. Velika prednost simulacije je i mogućnost animacije ili grafičkog predstavljanja rezultata. Pored toga što se animacija može koristiti za validaciju i verifikaciju ona može i da efektno predstavi rad sistema, što se može koristiti i u obuci i u razumevanju rada sistema.

3.3 PREDNOSTI I NEDOSTACI SIMULACIJE

Pri donošenju odluke o primeni simulacije za analizu sistema važno je biti upoznat sa njenim dobrim i lošim stranama. Razvoj računarstva i programskih jezika doprineli su da neke loše osobine simulacije nestanu, a da dobre dođu još više do izražaja.

Brzina izvršenja simulacionih modela najčešće više nije ograničavajući faktor za izbor ovog pristupa. Takođe, moguće je i izvršenje u (znatno) skraćenom vremenskom periodu, čak i kod analize sistema gde procesi mogu trajati i mesecima ili godinama. Pored toga, moguće je izvršiti više ponavljanja iste simulacije da bi se povećala statistička pouzdanost dobijenih podataka. Napredak u simulacionim metodologijama omogućio je korisnicima da dinamički proučavaju sistem u realnom vremenu za vreme izvršenja simulacije i oslobodio ih je od unošenja velikog broja podataka, naredaba i proračuna potrebnih za izvršenje simulacije. To znači da veći broj korisnika različitih struka može da koristi simulaciju za modeliranje različitih sistema. Analiza modela i rezultata olakšana je korišćenjem prethodno definisanih izlaza gde se dobijeni podaci predstavljaju tabelarno, grafički ili animacijom. Animacija je korisna i kod provere rada modela kao i za predstavljanje rada modela. Provera ponašanja modela i ispravnost relacija unutar modela lako se može uočiti posmatranjem modela u toku izvršenja simulacije.

Nedostaci simulacije nisu direktno vezani za modeliranje i analizu, već sa očekivanjima vezanim za simulacione projekte. Najčešće greške u primeni simulacije vezane su za ulazne podatke u simulacioni model. Simulacija ne može da da precizne rezultate kad ulazni podaci nisu precizni. Koliko god da je dobar model sistema, korisnik ne može da očekuje da dobije dobre izlazne podatke ukoliko ulazni podaci nisu kvalitetni. Prikupljanje podataka je jedan od najtežih zadataka u simulaciji. Često se ne ostavi dovoljno vremena za prikupljanje podataka (snimanje na terenu, ankete korisnika itd.), a i sami programeri više vole da razvijaju model nego da skupljaju podatke. Drugi nedostatak ili način loše primene simulacije je kod očekivanja vezanih za rezultate simulacije. Simulacija ne daje jednostavne odgovore na složene probleme. Prilikom posmatranja složenog sistema nije dovoljno uprostiti sistem skupom ograničenja i zatim tražiti delimične optimume jer se može desiti da veze između delova sistema utiču na

ukupno najbolje rešenje koje nije jednako nijednom parcijalnom rešenju. Zato je važno biti oprezan kod složenih sistema da se prilikom modeliranja verno preslikaju sve relacije u sistemu. Ograničenja u modelu koja pojednostavljaju sistem su korisna kada je sistem lako „razgradiv“ i kada su resursi i vreme za modeliranje ograničeni. Planeri i menadžeri očekuju, nakon puno resursa i vremena potrošenih na izradu simulacionog modela, da simulacija da rešenje problema. Na žalost, simulacija ne rešava problem sama po sebi. Samo sprovođenje simulacije i analiza ne mogu da reše problem. Simulacija pruža donosiocima odluka podatke i načine za rešavanje problema. Rezultati simulacija za različita alternativna rešenja mogu poslužiti donosiocu odluka u daljem postupku odlučivanja o sudbini projekta. Dalje analize imaju za cilj ispitivanja o mogućnostima i isplativosti primene rešenja (ekonomske analize, finansijske, višekriterijumske analize, itd.).

3.4 VALIDACIJA I VERIFIKACIJA

Jedan od najznačajnijih i najtežih zadataka sa kojim se sreće modelar u postupku izgradnje modela su verifikacija i validacija simulacionih modela (*Radenković et al., 1999*) (Prilog I). Problem validacije modela proističe iz činjenice da je model uvek uprošćena slika realnog sistema koji predstavlja, odnosno pojednostavljeni pogled na realni sistem koji se istražuje. Pored toga, u model se gotovo uvek unose određene aproksimacije realnosti, što proces validacije čini još važnijim. Iz svega toga proističe da se model mora testirati kako bi se ustanovilo da li je on pouzdan, bez grešaka i da li je dovoljno uverljiv za sve one koji će ga koristiti. Proces koji proverava da se model ponaša kako je i zamišljeno naziva se verifikacija. Nekada je vrlo teško proveriti da li model dobro predstavlja stvarni sistem ako model ne funkcioniše kako je zamišljeno. Ne treba proveravati model koji predhodno nije verifikovan. Proces provere da li je model dobro predstavlja realnost zove se validacija.

Verifikacija simulacionih modela

Odnosi se na proveru da li je simulacioni program, kojim se implementira model, bez grešaka i konzistentan sa modelom. To je u stvari poređenje konceptualnog modela sa računarskim kodom kojim se takva koncepcija implementira. Proces verifikacije

treba da pokaže da li je i u kojoj meri, konceptualni model na odgovarajući način predstavljen računarskim kodom, odnosno u kojoj se meri slažu konceptualni (pretpostavke za komponente sistema i strukturu; vrednosti parametara; apstrakcije i pojednostavljenja u modelu) i računarski kod.

Validacija simulacionih modela

Odnosi se na postupak određivanja da li je model precizna reprezentacija realnog sistema. Najčešće to je jedna iterativna procedura u kojoj se ponašanje modela poredi sa ponašanjem realnog sistema i uočena neslaganja i razlike koriste za dogradnju i ispravku modela. Postupak poboljšanja modela se nastavlja, sve dok se ne odluči da dobijena tačnost modela zadovoljava.

Iako se verifikacija i validacija modela konceptualno razlikuju, najčešće se simultano sprovode od strane modelara. Razlog za to je što se ova dva procesa u praksi dobrim delom poklapaju. Naime, ukoliko jedan simulacioni program proizvodi besmislice, nije uvek jasno koliko su krive greške u konceptualnom modelu, koliko greške u programiranju, a koliko korišćenje pogrešnih podataka. Zato se često kaže da su izgradnja modela, verifikacija i validacija u dinamičkoj povratnoj sprezi.

3.5 PRIMENA SIMULACIJE U ŽELEZNIČKOM SAOBRAĆAJU

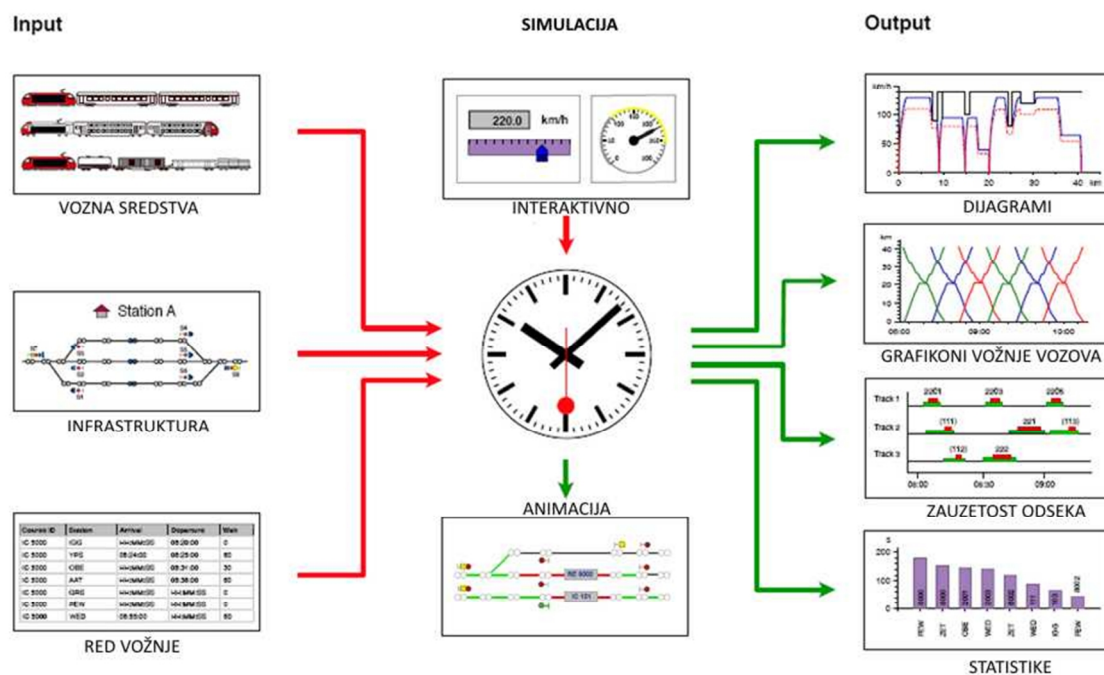
Analiza saobraćajnih procesa koji se odvijaju u stanicama, na prugama i u železničkim mrežama može se izvršiti upotrebom simulacionih modela. Simulacioni sistemi za mikro nivo posmatranja (kao što su RailSys, OpenTrack i sl. (*Barber et al., 2007*)) mogu da vrlo precizno oponašaju saobraćajne procese i tokove u železničkoj mreži koristeći detaljne informacije o parametrima pruge, signalnom sistemu, redu vožnje vozova, karakteristikama voznih sredstava, uz jednostavna unapred definisana pravila o saobraćaju vozova. Ovakvi sistemi mogu se koristiti za procenu efekata primarnih kašnjenja vozova na zauzetost koloseka i odseka i na uticaj na ostale vozove u sistemu. Procena inicijalnog (primarnog) kašnjenja vozova može se zasnivati na nekoj od pretpostavljenih ili empirijskih raspodela. Simulacija može da ukaže na konflikte trasa vozova izazvanih poremećajima u modelu, a rezultati mogu da se koriste i za

procenu stabilnosti reda vožnje i za sagledavanje uticaja kašnjenja voza na ostale operacije.

Primena asinhronih simulacionih modela je način da se simuliraju železnički saobraćajni procesi uz stohastički generisana vremena polazaka vozova. Cilj ovih modela je izrada reda vožnji koji ne sadrži konflikte tako što se unapred definisane trase vozova preraspoređuju. Naime, različite kategorije vozova raspoređuju se po redosledu (asinhrono) u skladu sa njihovim prioritetima. Konflikti trasa vozova rešavaju se u skladu sa pravilima reda vožnje. Efekti primarnih kašnjenja generišu se npr. Monte Karlo simulacijom i ocenjuju se kroz nepredviđena zaustavljanja i čekanja vozova i promenama u zauzetosti ograničavajućih odseka sistema. Ova vrsta simulacija najčešće se primenjuje kod izrade reda vožnje za određene linije ili koridore, ali nije efikasna u izradi reda vožnje za mrežu pruga (*D'ariano et al., 2008*).

Modeli za sinhronu simulaciju (npr. RailSys i OpenTrack(*Barber et al., 2007*)) prepoznatljivi su po ulaznim podacima koji sadrže detaljne podatke o pruzi, redu vožnje i voznim sredstvima, kao i po istovremenoj (sinhronoj) simulaciji kretanja vozova. Sinhroni simulacioni modeli mogu da modeliraju veoma velike mreže, ali zahtevaju veliki rad na izradi topologije infrastrukture, položaju signala i unošenju reda vožnje. Rezultati ovih modela koriste se u proceni određenih infrastrukturnih rešenja, testiranju novih pravila saobraćaja vozova ili signalizacija, kao i za testiranje različitih alternativa reda vožnje. Modeli daju rezultate za prethodno definisane determinističke ili stohastičke ulazne podatke. Optimalna rešenja ne dobijaju se primenom ovih simulacionih modela, već se njihovi rezultati mogu koristiti kao ulazni podaci za neke druge optimizacione modele. Ovi simulacioni modeli mogu pri primeni različitih redova vožnje da procene sekundarna i ukupna kašnjenja svih vozova u velikim mrežama, uz dodate determinističke ili stohastičke vrednosti primarnih kašnjenja. Ponašanje ovih modela i rešavanje konfliktnih situacija zavisi od unapred definisanih pravila za rešavanje konflikata koja ne mogu uvek da predstavljaju situacije koje se dešavaju u realnim sistemima. Takođe, primarna kašnjenja na granicama modela ne mogu se uvek predstaviti determinističkim ili nekim od pretpostavljenih teorijskih raspodela kojima se opisuju zakonitosti u kašnjenju vozova. Tumačenje rezultata ovih modela kao i definisanje ulaznih podataka (početna kašnjenja i pravila rešavanja konfliktnih situacija)

zahteva poznavanje pravila saobraćaja vozova i ponašanja sistema u različitim saobraćajnim scenarijima.



Slika 3.1 Šematski prikaz simulacionog paketa za saobraćaj vozova
(primer preuzet sa: <http://www.opentrack.ch/>)

Na Slici 3.1 predstavljen je najčešći koncept rada sinhronih simulacionih modela. Definisane ulazne podatke može da oduzme dosta vremena, ali sa druge strane omogućava jednostavno ponavljanje simulacije i eksperimentisanje. Animacija se koristi pri interaktivnom upravljanju simulacijom, ali i za praćenje hoda vozova i stanja zauzetosti odseka. Izlazni rezultati lako se mogu analizirati u unapred definisanim tipovima grafikona i tabela.

3.6 REZIME

Kod složenih sistema, kao što su saobraćajni procesi u železničkim sistemima, simulacija je često jedini način za analizu rada sistema. Neki sistemi su toliko složeni da je teško razumeti način rada i međusobnih veza u sistemu bez dinamičkog modela. Simulacioni modeli su jedini postojeći metod koji dozvoljava eksperimentisanje sa sistemom koji ne može da se remeti. Takođe, moguće je i testiranje novih koncepcija i

rešenja pre implementacije u stvarnom sistemu. Dva su osnovna pristupa za analizu sistema: promena uslova (ili pravila) ili promena objekata (infrastrukturnih rešenja).

Pri izradi simulacionog modela složenog saobraćajnog sistema treba imati u vidu sve zahteve koji taj model mora da ispuni. Kvalitet modela zavisiće od pravilno odabranog odnosa zahteva koji se postavljaju. Ravnoteža u zahtevima doprineće da razvoj modela omogući dovoljno kvalitetne rezultate uz minimalni utrošak resursa. Sa jedne strane, zahteva se složen model koji će uzeti u obzir sve relacije, zakonitosti i pravila koja postoje u sistemu sa mogućnošću jednostavnog unosa ulaznih podataka. Sa druge strane, izlazni podaci (rezultati) moraju biti takvi da detaljno i razumljivo predstavljaju rad sistema. Poštujući ove zahteve, modeliranje složenih sistema zahteva u određenoj meri korišćenje pojednostavljenja rada sistema (npr. definisanje načina rešavanja konfliktnih situacija), postavljanje granica modela (modeliranje samo određenih delova sistema) i pretpostavki o ponašanju sistema (npr. pretpostavke o kašnjenju vozova).

Prema tome, simulacioni modeli saobraćaja vozova mogu biti različitog nivoa, od mikroskopskih, preko mezoskopskih do makroskopskih modela uz različite nivoe složenosti i vremenske intervale posmatranja. Rezultat simulacije koristi se u analizi rada sistema pri donošenju operativnih, taktičkih i strateških odluka.

4 TEORIJA PETRIJEVIH MREŽA I NJIHOVA PRIMENA U SIMULACIONOM MODELIRANJU

4.1 UVOD

Danas se može naći puno različitih paketa programa za simulaciju različitih namena i namenjene su različitim korisnicima. Do ovakvo velikog broja programa došlo je zbog potreba kompanija na tržištu da imaju jednostavan softver koji može da se koristi brzo i efikasno baš za određenu oblast primene. To su omogućile nove softverske i hardverske mogućnosti modernih računara. Moderni softverski paketi za simulaciju imaju pojednostavljen interfejs tako da korisnik ne mora puno vremena da provede u proučavanju i obuci za simulacioni paket. Primeri simulacionih programskih paketa za simulaciju saobraćaja vozova su npr. OpenTrack i RailSyS (*Barber et al., 2007*). Ipak, kod nekih specifičnih problema nije moguće primeniti gotove simulacione programske pakete već je neophodno razviti simulacioni model u nekom od postojećih simulacionih programa ili jezika. Jedan od pristupa simulacionom modeliranju je i korišćenje Petrijevih mreža koje je u svojoj doktorskoj disertaciji definisao Carl Adam Petri (*Petri, 1962*). Od tada, pa do danas, Petrijeve mreže su značajno evoluirale u veoma moćan alat za modeliranje složenih sistema (Prilog II). U osnovnom tipu Petrijevih mreža tokeni se međusobno ne razlikuju. Ovo je nedostatak koji se ispoljava kod kreiranja velikih i složenih modela sistema. Iz tog razloga razvijeni su različiti dijalekti koje možemo predstaviti zajedničkim imenom Petrijeve mreže visokog nivoa.

4.2 PETRIJEVE MREŽE

Petrijeve mreže su alat za grafičko i matematičko modeliranje koji je primenljiv na mnoge sisteme. Dobar su i napredan alat za opisivanje i izučavanje sistema za obradu informacija koji su konkurentni, asinhroni, paralelni, nedeterministički i stohastički. Kao grafički alat, Petrijeve mreže mogu se koristiti i kao sredstvo za vizuelnu komunikaciju (slično blok šemama i blok dijagramima i mrežama). Tokeni koji se koriste u ovim mrežama simuliraju dinamičke i konkurentne aktivnosti sistema. Kao matematički alat mogu se koristiti za postavljanje jednačina stanja sistema, algebarske proračune i ostale matematičke modele koji opisuju ponašanje sistema. Njihova primena je moguća u veoma širokom spektru aplikacija (*Fanti et al., 2006, Gerogiannis et al., 1998, Hruz i Zhou, 2007, Vernez et al., 2003*). Mogu se primeniti na bilo koju oblast ili sistem koji se može opisati grafički kao blok šeme i koji ima potrebu za nekim predstavljanjem paralelnih ili konkurentnih aktivnosti. Ipak, mora se obratiti pažnja kod primene, vodeći računa o ravnoteži nivoa modeliranja i mogućnosti analize. Što je opštiji model teže ga je analizirati. Poznato je da je glavni nedostatak Petrijevih mreža složenost problema t.j. modeli Petrijevih mreža mogu biti preveliki za analizu sistema čak i umerene veličine. Kod primene Petrijevih mreža često je neophodno dodati određene promene ili ograničenja za kreiranje nekih modela. Najčešće i najperspektivnije oblasti primene su modeliranje i analiza distributivnih sistema, distributivnih sistema baza podataka, konkurentnih ili paralelnih programa, proizvodnih i industrijskih kontrolnih sistema, sistema diskretnih događaja, multiprocesorskih sistema, raznih računarskih problema, lokalnih mreža, pravnih sistema, ljudskih faktora, neuronskih mreža, digitalnih filtera i modela odlučivanja.

Primena računarskih programskih paketa je neophodna za praktičnu primenu Petrijevih mreža. Danas postoji jako veliki broj razvijenih gotovih programskih paketa. Uobičajeno je da razne grupe istraživača koje se bave Petrijevima mrežama razviju sopstvene programske pakete i alate koji im pomažu u crtanju, analizi i simulaciji različitih oblasti (*Gerogiannis et al., 1998*) (Prilog II).

4.3 TEORIJSKE POSTAVKE PETRIJEVIH MREŽA

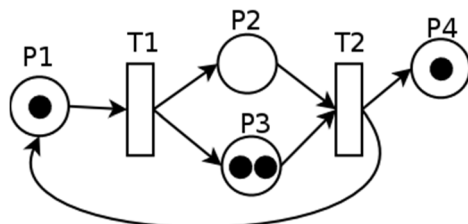
Teorija Petrijevih mreža zasniva se na matematičkoj teoriji grafova i to na dvodelnim (bipartitnim) grafovima. Dvodelni graf je graf čiji čvorovi mogu da se podele na dva različita skupa V_1 i V_2 tako da svaka grana povezuje jedan čvor iz V_1 i jedan čvor iz V_2 pod uslovom da ne postoje dve grane u istom skupu. Razvoj računara omogućio je proširenje primene teorije grafova i iz teorije grafova nastale su Petrijeve mreže. Petrijeve mreže su matematički alat za modeliranje koji se koristi u analizi i simulaciji konkurentnih sistema. Sistem se modelira kao dvodelni usmereni graf sa dva skupa čvorova: skup mesta koji su reprezent stanja ili objekata sistema i skup događaja ili prelaza koji određuju dinamiku sistema. Postoje dodatna ograničenja čvorova i grana koje ograničavaju ponašanje sistema. Petrijeva mreža je jedna od nekoliko matematičkih opisa diskretnih distributivnih sistema.

Formalna definicija Petrijevih mreža (Murata, 1989):

Petrieva mreža je uređena petorka $PN = (P, T, I, O, M)$, gde je:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ je konačan neprazan skup *mesta (Places)*;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ je konačan neprazan skup *prelaza (Transitions)*;
- I : je ulazna funkcija, $(P \times T) \rightarrow \mathbb{N}$, gde je \mathbb{N} skup nenegativnih celih brojeva. Vrednost $I(p, t)$ je broj (usmerenih) *grana (arcs)* od mesta p do prelaza t ;
- O : je izlazna funkcija, $(T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$, gde je vrednost $O(t, p)$ broj grana iz prelaza t do mesta p ;
- M : $P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ je početno obeležavanje koje dodeljuje mestu p nenegativan celi broj k , t.j., obeležava (markira) mesto p sa k tokena.

U grafu Petrijeve mreže, *mesta* se grafički predstavljaju krugovima, a *prelazi* pravougaonicima ili kratkim ravnim linijama (Slika 4.1). Grane u ulaznoj i izlaznoj funkciji predstavljene su usmerenim linijama.



Slika 4.1 Primer grafa Petrijeve mreže

U grafu Petrijevih mreža (Slika 4.1) prikazuju se mesta, prelazi, označavanje, ulazna funkcija i izlazna funkcija (Prilog III). Markiranje M_i se predstavlja tokenima u mestu p_i . Broj tokena u mestu p_i jednak je vrednosti označavanja M_i . Ulazna i izlazna funkcija se predstavljaju usmerenim granama - strelicama.

U grafu Petrijevih mreža koriste se dva tipa grana:

- ulazne grane (usmerene od mesta ka prelazu),
- izlazne grane (usmerene od prelaza ka mestu).

Moguće je uvođenje novih tipova grana u specifičnim dijalektima ili alatima Petrijevih mreža.

4.3.1 PRINCIP RADA PETRIJEVIH MREŽA

Osnovno pravilo na kom se zasnivaju Petrijeve mreže je pravilo za omogućavanje prelaza (*transition enabling*) i prelaz (*firing*). Iako ovo pravilo izgleda prosto njegove aplikacije u teoriji Petrijevih mreža su veoma ozbiljne i složene. Petrijeva mreža je posebna vrsta usmerenog grafa zajedno sa početnim stanjem koje se zove početno markiranje M_0 (*initial marking*). Graf Petrijevih mreža N je usmeren težinski bipartitni graf koji se sastoji od dve vrste čvorova koji se zovu mesta (*places*) i prelazi (*transitions*), gde su grane (*arcs*) veza od mesta do prelaza ili od prelaza do mesta. Grafički, mesta se crtaju kao krugovi, a prelazi kao linije ili kao pravougaonici. Grane se obeležavaju njihovim težinama (pozitivni celi brojevi), gde se grana obeležena težinom k može tumačiti kao skup k paralelnih grana. Markiranje (*marking*) dodeljuje svakom mestu u mreži nenegativni celi broj. Ako markiranje dodeli mestu p nenegativni celi broj k kaže se da je p markiran sa k tokena. Grafički to se obeležava sa k crnih tačaka (tokena) u mestu p . Markiranje se obeležava sa M (m vektorom), gde je m ukupan broj mesta. Tako je p -ti element od M ($M(p)$) broj tokena u mestu p .

U modeliranju, koristeći koncept uslova i događaja, mesta predstavljaju uslove, a prelazi predstavljaju događaje. Prelaz (događaj) ima određeni broj ulaznih (*input*) i izlaznih (*output*) mesta koja predstavljaju preduslove i postuslove događaja, respektivno. Prisustvo tokena u mestu se tumači kao tvrdnja o tačnosti uslova povezanih sa tim mestom, a to znači k tokena koji se nalaze u mestu pokazuju da su k podataka ili resursa na raspolaganju. Neke od uobičajenih interpretacija prelaza i njihovih ulaznih i izlaznih mesta prikazane su u Tabeli 4.1 (*Murata, 1989*).

Tabela 4.1 Neke od interpretacija prelaza i mesta

Ulazna mesta	Prelazi	Izlazna mesta
Preduslovi	Događaji	Postuslovi
Ulazni podaci	Računanje	Izlazni podaci
Ulazni signali	Procesor signala	Izlazni signali
Potrebni resursi	Proces rada	Izlazni resursi
Uslovi	Primena logike	Zaključci
Baferi	Procesori	Baferi

Ponašanje mnogih sistema može se opisati na osnovu stanja sistema i njihovih promena. Da bi se simuliralo dinamičko ponašanje sistema, stanje ili markiranje u Petrijevim mrežama se menja na osnovu sledećih pravila prelaza (*transition-firing rule*):

1. Za prelaz t kaže se da je omogućen (*enabled*) ako je svako ulazno mesto p od t markirano sa najmanje $w(p,t)$ tokena, gde je $w(p,t)$ težina grane od p do t .
2. Omogućeni prelaz može i ne mora da se aktivira (*fire*) (u zavisnosti od toga da li se događaj stvarno desio).

Aktiviranje omogućenog prelaza t uklanja $w(p,t)$ tokena iz svakog ulaznog mesta p od t i dodaje $w(t,p)$ tokena u svako izlazno mesto p od t (gde je $w(p,t)$ težina grane od t do p).

Prelaz bez ijednog ulaznog mesta zove se izvorni prelaz (*source transition*), a onaj bez ijednog izlaznog mesta zove se završni prelaz (*sink transition*).

Za prethodno pomenuto pravilo omogućavanja prelaza, pretpostavlja se da svako mesto može da sadrži neograničeni broj tokena. Kod modeliranja mnogih sistema prirodno je razmatrati gornju granicu broja tokena koja može da postoji u mestu. Takve Petrijeve mreže nazivaju se mreže sa konačnim kapacitetom i kod njih svako mesto ima dodeljeni kapacitet mesta, koji je maksimalni broj tokena koji može da se nađe u mestu u bilo kom trenutku.

Nakon modeliranja sistema Petrijevim mrežama postavlja se pitanje šta se može dobiti tim modelom. Najvažniji deo primene Petrijevih mreža nije njihovo korišćenje za modeliranje već za analizu modeliranog sistema. Analize modeliranog sistema omogućavaju uvid u njegovo ponašanje. Prednost Petrijevih mreža je njihova mogućnost analize mnogih karakteristika i problema vezanih za konkurentne sisteme.

Dve osnovnatipa karakteristika mogu se izučavati Petrijevim mrežama: one koji zavise od početnog markiranja i one koji su nezavisne od početnog markiranja. Prva vrsta su karakteristike zavisne od markiranja ili karakteristike ponašanja, a druga vrsta karakteristika su one koje su vezane za strukturu.

Tri osnovna pristupa analizi Petrijevim mrežama su: analiza dostupnosti (*reachability analysis*), pristup *matrix-equation* i simulacija. Prvi pristup omogućava nabranje svih dostupnih markiranja dok se tehnika matrix equation primenjuje samo u specijalnim dijalektima Petrijevih mreža ili specijalnim situacijama. Simulacija diskretnih događaja modelom Petrijevih mreža je način za utvrđivanje karakteristika kod složenih sistema. Simulacija je skup proces koji zahteva puno vremena, pa ipak, simulacija Petrijevim mrežama je pogodan i direktan, ali i efikasan pristup kojim se može izvršiti validacija karakteristika diskretnog sistema zasnovanog na događajima.

4.3.2 OSOBINE PETRIJEVIH MREŽA

Kao matematički alat Petrijeva mreža poseduje dosta osobina koje se mogu koristiti u kontekstu modeliranja sistema omogućavajući analizu sistema. Dve osnovne karakteristike su ponašanje i struktura sistema. Karakteristike ponašanja sistema su one koje zavise od početnog stanja ili markiranja Petrijeve mreže. Strukturne karakteristike ne zavise od početnog markiranja Petrijeve mreže već od topologije ili strukture mreže. Petrijeve mreže mogu se opisati kroz njihove karakteristike tako da mogu biti: dostupne (*reachability*), bezbedne (*safeness*) i žive (*liveness*) (*Anderson, 2005*).

Dostupnost

Važno pitanje u modeliranju sistema zasnovanog na događajima je da li taj sistem može da dođe u određeno stanje ili da ostvari određeno funkcionalno ponašanje. Da bi saznali da li modelirani sistem može da dospe u određeno stanje kao rezultat zahtevanog funkcionalnog ponašanja neophodno je pronaći takav niz okidanja prelaza koja će transformisati markiranje M_0 u M_i gde je M_i određeno stanje, a niz okidanja predstavlja određeno funkcionalno ponašanje. Stvarni sistem može da dođe u određeno stanje nakon ostvarenja različitih dozvoljenih obrazaca ponašanja koja bi pretvorila M_0 u traženu M_i . Za markiranje M_i kaže se da je dostupno iz markiranja M_0 ako postoji niz okidanja prelaza koji transformišu markiranje M_0 u M_i .

Bezbedne mreže

U nekim slučajevima kod Petrijevih mrežama važno je utvrditi da li u nekim delovima sistema dolazi do zasićenja. Karakteristika Petrijevih mreža koja omogućava da se identifikuje postojanje zasićenja (*overflow*) je koncept ograničenja (*boundedness*). Za mesto p se kaže da je k -bounded, ako je broj tokena u p uvek manji ili jednak k (k je nenegativan ceo broj), za svako markiranje M dostupno iz početnog stanja M_0 . Petrijeva mreža je bezbedna ako je 1 -bounded.

Žive mreže

Koncept žive mreže je usko povezan sa situacijama zastoja (*deadlock*). Modeliranje Petrijevom mrežom sistema koji nema zastoje mora biti živo (ili *live*). Ovo ukazuje da za svako dostupno markiranje M , uvek je moguće okinuti svaki prelaz u mreži preko nekog niza okidanja.

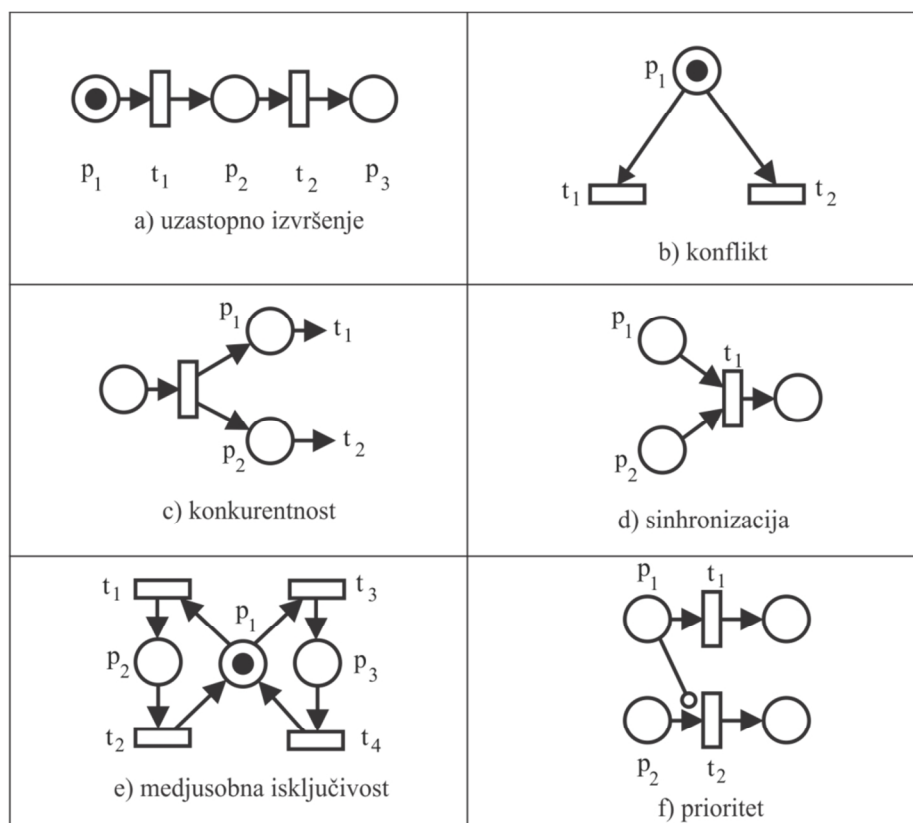
4.3.3 PREDNOSTI PETRIJEVIH MREŽA U MODELIRANJU

Prepoznatljive karakteristike koje se mogu uočiti u dinamičkim diskretnim sistemima kao što su konkurentnost, donošenje odluka, sinhronizacija i postojanje prioriteta mogu se efikasno modelirati Petrijevim mrežama (Slika 4.2). Osnovne osobine Petrijevih mreža koje omogućavaju modeliranje i analizu dinamičkih diskretnih sistema su (*Murata, 1989*):

1. *Uzastopna izvršenja (Sequential Execution)*; Na Slici 4.2a prelaz t_2 može da okine samo nakon okidanja t_1 . Ovo nameće ograničenje definisano kao “ t_2 posle t_1 ”. Ovakvo ograničenje je tipično kod izvršenja delova dinamičkih sistema i definiše odnos između aktivnosti.
2. *Konflikt (Conflict)*; Prelazi t_1 i t_2 su u konfliktu na Slici 4.2b. Oba prelaza su omogućeni, ali okidanje bilo kog prelaza vodi do onemogućavanja drugog prelaza. Ovakva situacija može nastati na primer kada dva voza zahtevaju pristup istom odseku ili putu vožnje. Konflikt koji nastane može se razrešiti na deterministički ili nedeterministički način (definišući odgovarajuće verovatnoće prelazima koji su u konfliktu).
3. *Konkurentnost (Concurrency)*; Na Slici 4.2c prelazi t_1 i t_2 su konkurentni. Konkurentnost je važan atribut kod interakcija sistema. Neophodan uslov da bi

prelaz bio konkurentan je postojanje prethodnog prelaza koji šalje tokene u dva ili više izlaznih mesta.

4. *Sinhronizacija (Synchronization)*; U dinamičkom sistemu uobičajeno je da jedan događaj zahteva više resursa. Rezultujuća sinhronizacija resursa može biti predstavljena tipom prelaza koji je prikazan na slici 4.2d. Na slici pod *d*) prelaz t_1 je omogućen samo kada svako mesto p_1 i p_2 dobije token. Prijem tokena u svako od dva mesta može biti rezultat mogućeg složenog niza operacija na drugom mestu u modelu Petrijeve mreže. Prelaz t_1 omogućava modeliranje procesa spajanja.
5. *Međusobna isključivost (Mutually exclusive)*; Dva procesa su međusobno isključiva ako ne mogu biti izvršena u isto vreme zbog ograničenja korišćenja zajedničkih resursa. Na Slici 4.2e prikazana je struktura međusobne isključivosti dva procesa.



Slika 4.2 Predstavljanje osnovnih mogućnosti sistema Petrijevih mreža

6. *Prioriteti (Priorities)*; Klasične Petrijeve mreže nemaju mogućnost predstavljanja prioriteta. Ova mogućnost modeliranja može se ostvariti uvođenjem

ograničavajuće grane (*inhibitor arc*). Ograničavajuća grana povezuje ulazno mesto sa prelazom i simbolično je predstavljeno granom koja se završava sa malim krugom. Postojanje ograničavajuće grane koja povezuje ulazno mesto sa prelazom dovodi do promene uslova omogućavanja prelaza. U prisustvu ograničavajuće grane, prelaz se posmatra kao omogućen ako je svako ulazno mesto povezano sa prelazom normalnom granom sadrži najmanje onaj broj tokena koji je jednak težini grane i ako nema tokena prisutnih u svakom ulaznom mestu povezanom sa prelazom preko ograničavajuće grane. Pravilo okidanja prelaza je isto kao kod uobičajeno povezanih mesta. Ipak, okidanje ne menja markiranje u mestima koja su povezana ograničavajućom granom. Graf Petrijeve mreže sa ograničavajućom granom prikazan je na slici 4.2f, gde se vidi da je t_1 omogućen ako p_1 ima token, dok je t_2 omogućen ako p_2 ima token, a p_1 nema token. Ovo daje prioritet t_1 u odnosu na t_2 .

4.4 PETRIJEVE MREŽE VISOKOG NIVOVA

Da bi Petrijeve mreže mogle lakše i efikasnije da se koriste pri modeliranju i analizi složenih sistema, definišu se novi dodatni parametri i promenljive. Nadogradnja osnovnog tipa Petrijevih mreža zasniva se na dijalektima koji definišu specifične karakteristike mreže. Takvi dijalekti, preko dodatnih karakteristika i parametara, čine da Petrijeve mrežu postanu moderan i efikasan alat u analizi sistema. Ovakve Petrijeve mreže zovu se Petrijeve mreže visokog nivoa (*high-level Petri nets-HLPNs*) (Hrúz i Zhou, 2007).

Petrijeve mreže visokog nivoa definišu se kao struktura $HLPN = (P, T, D; Type, Pre, Post, M_0)$ gde je:

$Pre, Post, M_0$ gde je:

- D je neprazan konačan skup nepraznih domena gde se svaki element D naziva tip (*type*);
- $Type: P \cup T \rightarrow D$ je funkcija koja se koristi da dodeli *tip mestu* i da definiše načine prelaza (*transition modes*);
- $Pre, Post: TRANS \rightarrow \mu PLACE$ su prei postmapiranja sa

$$TRANS = \{(t, m) \mid t \in T, m \in Type(t)\}$$

$$PLACE = \{(p, g) \mid p \in P, g \in Type(p)\}$$
- $M_0 \in \mu PLACE$ je multiskup definisan kao početno markiranje mreže ($\mu PLACE$ je skup multiskupova za skup, $PLACE$).

Graf Petrijeve mreže visokog nivoa sastoji se od:

- Mrežnog grafa, koji sadrži skup čvorova dve različite vrste (mesta i prelazi) i grane koje povezuju mesta i prelaze i prelaze i mesta.
- Tipova mesta, gde je svaki tip dodeljen svakom mestu.
- Obeležavanje mesta, definisano kao skup elemenata izabranih od tipova mesta i povezan sa mestima, gde je ponavljanje moguće. Objekat dodeljen mestu nazivamo token.
- Oznaka grana. Grane sadrže izraze koji se mogu sastojati od konstanti, promenljivih i funkcija.
- Uslova prelaza. Logički izraz koji definiše prelaz.
- Deklaracija koje sadrže definicije tipova mesta, promenljivih i definicije funkcija.

U grafovima HLPN mreža kretanje tokena po modelu može se pratiti vizuelno i na taj način posmatrati kretanje objekata i podataka u samom modelu.

Osnovna ideja kretanja tokena po modelu zasnovana je na pravilima omogućavanja prelaza (*enabling of transitions*) i ostvarenja prelaza (*occurrence of transitions*) koja su definisana u pravilima prelaza (*Transition Rule*).

Prelaz je omogućen u zavisnosti od stanja mreže (*Net marking*). Stanje ili oznaka mreže sastoji se od skupa svih oznaka mesta mreže. Prelaz je, takođe, omogućen kada se mreža nalazi u stanju prelaza. Stanje prelaza je dodeljivanje ili zamena vrednosti za promenljive prelaza koje zadovoljavaju uslove prelaza (npr. logički uslov prelaza je *true*). Promenljive prelaza su sve one promenljive koje se pojavljuju u izrazu koji je dodeljen prelazu. To su uslovi prelaza i oznake grana koje su povezane sa tim prelazom. Omogućavanje prelaza uključuje i označavanje njegovih ulaznih mesta. Ulazno mesto prelaza je mesto koje je povezano sa prelazom sa granom koja ide od mesta do prelaza. Grana koja se kreće od ulaznog mesta do prelaza zove se ulazna grana prelaza. Svaka oznaka i izraz ulazne grane procenjuje se za stanje prelaza dajući multiskup tokena iste vrste kao za ulazno mesto. Ako svaka oznaka ulaznog mesta sadrži najmanje multiskup tokena ulazne grane (dobijen procenom izraza ulazne grane), onda je prelaz omogućen.

Omogućeni prelazi mogu se ostvariti. Kada se prelaz ostvari token se uklanja iz svog ulaznog mesta i token se dodaje svom izlaznom mestu. Izlazno mesto prelaza je

mesto koje je povezano sa prelazom pomoću grane koja je usmerena od prelaza do mesta. Grana koja vodi od prelaza do mesta (izlazno mesto prelaza) zove se izlazna grana prelaza. Ako je prelaz omogućen u određenom stanju on se može i ostvariti. Pri ostvarenju prelaza u određenom stanju automatski se ostvaruju sledeći događaji:

- za svako ulazno mesto prelaza: omogućeni token ulazne grane oduzima se iz obeležja ulaznog mesta,
- za svako izlazno mesto prelaza: multiskup tokena kao rezultat proračuna izraza obeležja izlazne grane dodaje se obeležju izlaznog mesta.

Teorijski, osnovne i Petrijeve mreže visokog nivoa, imaju iste mogućnosti primene, ali HLPN imaju mnogo više mogućnosti u modeliranju zbog njihovih strukturnih karakteristika. Kod Petrijevih mreža visokog nivoa, moguće je koristiti tipove podataka (*data types*) što pruža mogućnosti za složeno upravljanje podacima, jer je svakom tokenu dodeljena “boja” (*colour*) kao oznaka određene vrednosti za određeni složeni tip podataka. Logičke funkcije i definicije mogu se predstaviti upotrebom obojenih tokena, a mogu se dodeliti mestima, prelazima i granama. Takođe, kod HLPN, moguće je definisati hijerarhije u modelu, tako da se veliki i složeni model može dobiti kombinacijom više modula ili podmodela.

4.4.1 OBOJENE PETRIJEVE MREŽE

Obojene Petrijeve mreže (*Colored Petri nets*) koje je definisao Kurt Jensen (*Jensen, 1991*) karakteristične su po tome da je svaki token predstavljan „bojom“ koja definiše identitet tog tokena. Kod obojenih Petrijevih mreža (CPN) i ostalih Petrijevih Mreža višeg nivoa (HLPN), iz istorijskih razloga za token koji sa sobom nosi podatke kažemo da je obojen. Tokeni se u mreži međusobno se razlikuju po parametrima koji su im dodeljeni, pa kažemo da su različitih boja, za razliku od tokena u prostim Petrijevim mrežama gde tokeni nisu nosioci podataka i označeni su crnim tačkama (svi su međusobno isti – crni). S druge strane, svako mesto i svaki prelaz takođe može biti definisan skupom boja. Prelaz može da se aktivira ako se boje poklapaju. Aktiviranjem prelaza tokeni se uklanjaju iz ulaznog mesta i dodaju u izlazno mesto na isti način kao i u osnovnim Petrijevim mrežama, osim što je ta funkcionalna zavisnost definisana u zavisnosti od boje prelaza i boje tokena. Boja tokena može se menjati aktiviranjem prelaza i najčešće se koristi kao kompleksna struktura koja sadrži više podataka o tokenu. U složenim Petrijevim mrežama tokeni su nosioci raznih podataka koji mogu

biti slični i potpuno različiti po svojim karakteristikama (nizovi teksta, realni brojevi, itd.) i zato se svakom tokenu istog tipa može dodeliti jedna od boja iz palete.

4.4.2 VREMENSKE PETRIJEVE MREŽE

Potreba za uključivanjem promenljivih vezanih za vreme u različite modele dinamičkih sistema je očigledna jer se posmatrani sistemi u prirodi uvek gledaju u funkciji vremena. Petrijeva mreža koja sadrži vremensku promenljivu najčešće se definiše kao vremenska Petrijeva mreža (*Timed Petri Net*) koja sadrži tri karakteristike: topološku strukturu, označavanje strukture i pravila aktiviranja (*Wang, 2007*). Najčešće se primenjuje ista topologija kao i kod klasičnih Petrijevih mreža, dok se pri označavanju dodeljuju numeričke vrednosti za jedan ili više objekata u Petrijevoj mreži (prelazi, mesta ili grane). Pravila aktiviranja prelaza se različito definišu u zavisnosti od načina na koji je Petrijeva mreža obeležena vremenskim promenljivim. U odnosu na klasičnu mrežu, pravila aktiviranja prelaza u vremenskoj mreži definišu uslove prelaza u zavisnosti od stanja simulacionog časovnika. Vremenske mreže mogu biti determinističke ili stohastičke gde je vremenska promenljiva vezana za prelaze.

Kod determinističkih vremenskih Petrijevih mreža najčešći pristup je da se vremenske odrednice definišu uz svaki prelaz i na taj način određuju prelaze koji predstavljaju neke događaje za koje je potrebno vreme da se završe. Stohastičke vremenske mreže su definisane tako da su vremena aktiviranja definisana kao stohastičke promenljive u prelazima. Primena ovih mreža je danas veoma česta jer se pomoću ovih mreža visokog nivoa mogu modelirati različiti kompleksni sistemi.

Vreme u Petrijevim mrežama

Petrieve mreže su u originalu predložene kao model koji u sebi ne sadrži vreme ili verovatnoću. Koncept vremena je bio namerno izbegnut u originalnom radu Carl Adama Petrija (*1962*). Uvođenje vremena ograničava ponašanje mreže, t.j., struktura mreže samo delimično utiče na dinamičko ponašanje Petrijeve mreže. Za mnoge praktične primene neophodno je postojanje vremena u mreži, jer bez jasne predstave o vremenu nije moguće analizirati performanse i karakteristike modeliranog sistema.

Mesto zadržavanja

Postoji više načina za ubacivanje vremena u model Petrijeve mreže. Pošto se Petrijeva mreža sastoji od mesta i prelaza koji su povezani granama, tako postoji mogućnost dodeljivanja vremena mestima, prelazima i granama. U većini modela Petrijevih mreža vremensko zadržavanje određuje se u prelazima. Kod nadgrađenih Petrijevih mreža sa „obojenim“ tokenima, uobičajeno je dodeliti svakom tokenu podatak o prelaznom vremenu. Podatak sadrži vreme kada je token na raspolaganju za sledeće okidanje.

Vrste zadržavanja

Postoji nekoliko vrsta zadržavanja i to su: determinističko, nedeterminističko i stohastičko. Kod determinističkog, vreme zadržavanja tokena u mestu, prelazu ili grani je fiksno (određeno). Determinističko zadržavanje može se koristiti u nekim jednostavnijim analizama i ima ograničenu primenljivost. U stvarnim sistemima, vremensko zadržavanje najčešće predstavlja trajanje neke aktivnosti koja je najčešće promenljiva. Nedeterministička zadržavanja najčešće se definišu nekim vremenskim intervalom koji određuje trajanje zadržavanja. U ovim modelima najčešće se koristi stohastičko zadržavanje. Kod stohastičkog zadržavanja koristi se pretpostavljena raspodela verovatnoća za svako zadržavanje. Još jedan način za podelu vrsta zadržavanja u Petrijevim mrežama je podela na diskretna i neprekidna vremenska zadržavanja. Diskretni modeli koriste prirodne brojeve za definisanje dužine zadržavanja, dok neprekidni koriste realne nenegativne brojeve.

Vremenska komponenta u Petrijevim mrežama zahteva ponovno definisanje pravila okidanja i prelazaka. U klasičnoj Petrijevoj mreži prelaz je omogućen ako svako od *ulaznih mesta* sadrži dovoljno tokena. Samo omogućeni prelaz može da se *aktivira ili okine* (engl. *fire*) i *aktiviranje* je trenutno (npr. istog trenutka kada je token uzet iz *ulaznog mesta*, token se dodaje *izlaznom mestu*). Prelazi su u konfliktu ako dele *ulazno mesto*. Kod vremenskih Petrijevih mreža pravila prelaza i ulaza tokena moraju se promeniti da bi se odredilo kako se rešavaju konflikti i da li je *aktiviranje* trenutno ili nije. Ovo se rešava sa preselekcijom (engl. *Preselection*) i semantikom rasporeda (engl. *Race semantics*). Ako je aktiviranje trenutno, onda je neophodno dodeliti vreme omogućavanju prelaza. Ako je vreme dodeljeno omogućavanju prelaza, nema potrebe eksplicitno definisati kako se rešavaju konflikti jer se omogućeni prelazi „trkaju“

između sebe i onaj koji je prvi na redu po rasporedu on će prvi i da *aktivira* prelaz. Takođe, moguće je i eksplicitno definisati koji će prelaz prvi da *aktivira*, a to je preselekcija.

4.5 FAZI PETRIJEVE MREŽE

Mnogi istraživači videli su mogućnost primene Petrijevih mreža u oblasti sistema koji su zasnovani na pravilima. Petrijeve mreže mogu modelirati logiku znanja i upravljanja zaključivanjem. Visoke mogućnosti predstavljanja i modeliranja konkurentnih sistema čine Petrijeve mreže odgovarajućim alatom za predstavljanje fazi sistema. Ovo je nova oblast istraživanja (prva istraživanja bila su krajem 1980-tih godina (*Looney, 1988*)), ali je brzo postala intenzivna i obećavajuća oblast istraživanja. Petrijeve mreže kao grafički model koji se lako razume i ima mogućnosti dinamičkog predstavljanja, dobar su alat za modeliranje fazi sistema zasnovanih na pravilima i, generalno, procesa gde postoje fazi skupovi i fazi logika. Tokom godina, početna definicija modela je evoluirala dobijajući nove karakteristike koje su potrebne da se fazi sistemi bolje opišu formalizmom Petrijevih mreža. Tako je i definisan novi alat: fazi Petrijeve mreže (*fuzzy Petri nets* - FPN), koje su zasnovane na početnim pretpostavkama Petrijevih mreža, gde su neki elementi klasičnog formalizma (mesta, grane, prelazi i tokeni) redefinisani i dodati su novi elementi (*Virtanen, 1995*). U teoriji fazi sistema postoje raznolikosti i specifičnosti, pa pre treba reći da postoje različite fazi Petrijeve mreže (različite „fazifikacije“ formalizma Petrijevih mreža), nego da postoji jedna definicija fazi Petrijeve mreže. Promena sa PN na FPN nije jedinstvena i u literaturi je moguće naći različite predloge definicija fazi Petrijevih mreža (*Garg et al., 1991, Looney, 1994, Pedrycz i Camargo, 2003*). Postoji primetna razlika kod autora koji su se bavili istraživanjem oblasti fazi Petrijevih mreža. To se može objasniti veoma različitim oblastima primene, gde su predloženi različiti načini korišćenja formalizma, npr. (*Konar, 2005*). Posmatrajući nivo apstrakcije fazi Petrijevih mreža možemo posmatrati tri nivoa:

- fazi Petrijeve mreže kao teoretski modeli ili formalni modeli. Kod ovih FPN fazifikuju se neki elementi PN. Date su osnovne definicije za PN i FPN formalizme naglašavajući strukturnu stranu problema;

- FPN kao pomoćni alat u sintezi fazi sistema. PN se modifikuju da bi se izrada fazi sistema pojednostavila, i to tako da se predstavljaju i izvršavaju fazi sistemi bazirani na pravilima. Najprepoznatljivije mogućnosti PN formalizma koriste se za modeliranje konkurentnih procesa ili za sinhronizaciju njihovog izvršenja;
- PN se koriste kao podrška izradi praktičnih rešenja za sisteme na bazi fazi skupova u različitim oblastima primene i to direktno ili koristeći semantiku nekih drugih modela. PN se ovde koristi za modeliranje aplikacija za realne sisteme i na taj način se određene specifične karakteristike procesa projektuju na model.

Prema ovim kriterijumima, različite tehnike PN formalizma u oblasti fazi sistema se sada predstavljaju i razvrstavaju na tri osnovne kategorije (razvrstane po opadajućem nivou apstrakcije): teoretski modeli, tehnike i aplikacije (*Bugarin et al., 1999*).

Fazi Petrijeve mreže su definisane kao alat za predstavljanje nepouzdanog znanja o stanju sistema kombinujući Teoriju fazi skupova i formalizme PN. U zavisnosti od toga kakva je ova kombinacija, postoje različiti modeli FPN, što čini veoma široki spektar predloženih definicija iskaza i modela.

Da bi se dobila karakteristike PN koje na najbolji način opisuju realne sisteme, predloženi su različiti dijalekti originalnog modela PN. Najveći deo njih nalazi se u kategoriji Petrijevih mreža visokog nivoa (high level Petri nets). Jedna od varijanti Petrijevih mreža koja se koristi kao osnova za definisanje modela fazi Petrijevih mreža je vremenska Petrijeva mreža (*timed Petri nets*) koja se zasniva na činjenici da se procesi unutar PN (aktivacija i okidanje prelaza) nikad ne dešavaju istovremeno i da može doći do odlaganja (*Hrúz i Zhou, 2007, Pedrycz i Camargo, 2003*). Vremenske Petrijeve mreže imaju dodatnu vremensku promenljivu u modelu definisanu na dva različita načina: vreme omogućavanja aktivacije koje se javlja između trenutka kada je prelaz aktiviran i trenutka kada je izvršen; i vreme odlaganja koje se računa u samom procesu izvršenja (vreme između trenutka kada je prelaz izvršen i kada je promena u funkciji markiranja izlazne promenljive završena). Još jedan interesantan dijalekat su obojene Petrijeve mreže (*colored Petri nets*) koje su definisane tako da svaki token ima svoj identitet koji je predstavljen nekim podacima koje se sastoje u parametru tipa boja. Logičke jednačine i funkcije mogu se definisati koristeći boje tokena, a zatim povezati sa mestima, prelazima ili granama PN.

Formalizme fazi Petrijevih mreža je veoma teško predstaviti zbog različitih modela koji su predloženi u ovoj oblasti od kojih svaki ima specifične karakteristike. Postoje neke opšte karakteristike koje se uglavnom odnose na modeliranje sistema zasnovanog na pravilima. Uobičajena strategija modeliranja fazi sistema Petrijevom mrežom zasniva se na obavljanju dva koraka:

1. redefinisane nekog od elemenata tako da njegovo novo značenje više odgovara predstavljanju fazi informacija;
2. dodavanje novih strukturnih i funkcionalnih ili algoritamskih elemenata koje predstavljaju specifične karakteristike fazi sistema.

Najčešće je dovoljna primena samo jednog od ova dva koraka. Jedinствене definicije i izraze je teško dati zbog različitih pristupa, zbog čega i postoji potreba da se radi na unifikaciji u ovoj oblasti. Element PN formalizma kod kojeg se u najvećem broju istraživanja radilo na fazifikaciji je funkcija markiranja i značenje tokena. Najčešće se funkcija markiranja redefinisala kao: $M: P \rightarrow [0,1]; p_k \rightarrow M(p_k)$, gde p uzima vrednosti realnih brojeva u intervalu $[0,1]$ umesto celih prirodnih brojeva kao što je u klasičnoj definiciji. Vrednost $M(p_k)$ funkcije markiranja obično odgovara stepenu pripadnosti ili slaganja fazi elementa koje mesto p_k predstavlja. Na primer, u slučaju modeliranja fazi sistema, fazi skup kojim su opisane kategorije ulazno/izlaznih promenljivih vezan je za svako mesto p_k . Tada $M(p_k)$ predstavlja stepen ispunjenosti odgovarajuće pretpostavke. Evolucija markiranja je takođe promenjena zbog novog značenja tokena. Iako su mehanizmi i uslovi aktiviranja i izvršenja ostali isti, vrednosti tokena za izlazna mesta moraju se promeniti u skladu sa novim definicijama tako da predstavljaju stepen pouzdanosti u izrazima koji su vezani za izlazna mesta. Postoje i druge definicije funkcija markiranja koje predlažu korišćenje raspodele verovatnoća sa mestima u fazi Petrijevim mrežama (*Virtanen, 1995*).

Tehnike fazi Petrijevih mreža za modeliranje i primenu fazi sistema

Najčešće korišćene i razvijane aplikacije u oblasti fazi logike su sistemi zasnovani na fazi pravilima i to najviše fazi kontroleri. Prva uspešna primena PN u oblasti fazilogike bila je baš kod fazi kontrolera. Jedan od razloga je što je tome prethodila uspešna primena PN kod modeliranja ekspertnih sistema zasnovanih na (ne fazi) pravilima i zato što postoji strukturna sličnost između fazi sistema i PN. Iako se uočava veza između članova baze fazi pravila i mesta u Petrijevim mrežama i prelaza sa IF-

THEN pravilima. Na ovaj način PN postaje jednostavan grafički prikaz datih pravila i strukturalnih veza koje postoje u bazi fazi pravila. Takođe, proces izvršenja fazi logike može se povezati sa razvojem markiranja u PN, gde se u svakom trenutku može pratiti koja od pravila su primenjena (ona koja se odgovaraju aktivnim prelazima).

Da bi se definisali formalni opisi fazi sistema, mogu se redefinisati funkcije markiranja i tokena u „fazi markiranje“ i „fazi tokene“ (numeričke vrednosti u intervalu $[0,1]$) koji su vezani za proračune izvršenja pravila ili su povezani sa novim elementima u PN. Postoji sličnost između procesa izvršenja pravila u fazi rezonovanju i procesa aktiviranja prelaza u odgovarajućoj PN. Formalizam PN koristi se kao dodatni alat za opis različitih dinamičkih procesa koji se obavljaju u fazi rezonovanju. Fazi rezonovanjem modelira se znanje o radu kontrolnih procesa (ili sličnih sistema) koje se najčešće dobija iz iskustva radnika operatera. Ovo znanje oponaša se i replikuje preko skupa fazi pravila u fazi sistemu. Fazi rezonovanje u ovakvim sistemima obično imaju homogenu strukturu gde su promenljive opisane ili u pretpostavci (*antecedent*) ili u zaključku (*consequent*) tako da povezivanje između pravila nije dozvoljeno. Strukturne i semantičke promene koje su uvedene u opis fazi rezonovanja čine da Petrijeve mreže imaju dobar formalizam za njihovo predstavljanje. Povezivanje je dozvoljeno između pretpostavki, a strukturalna promena je izvedena u izvršenju. Izvršenje pravila mora se izvesti po redosledu, tako da svi zaključci povezani sa jednom promenljivom budu preuzeti pre korišćenja u zaključivanju u ostalim pravilima. Ova nova strukturalna veza, čini strategije izvršenja zaključivanja u fazi rezonovanju, koje nisu u potpunosti paralelne i zahtevaju određeni sekvencijalni mehanizam, koji se lako opisuje sa dinamičkim elementima Petrijevih mreža (tokeni, markiranje, aktiviranje i izvršenje prelaza). Ovaj pristup, koji se obično naziva i fazi ekspertni sistem, može da implementira različite tipove fazi rezonovanja, a najčešće se koristi Mamdani fazi rezonovanje (*Nakanishi et al., 1993*). Fazi Petrijeve mreže su odgovarajući formalizam za predstavljanje jer se hijerarhijsko izvršenje u fazi rezonovanju može direktno izvesti. Takođe, algoritamski opis različitih strategija izvršenja može se projektovati na dinamičke elemente FPN. Prvi model ovog tipa definisao je Looney (*Looney, 1988*) koristeći jednostavnu Petrijevu mrežu za predstavljanje matrice. Mnogi autori nastavili su u razvijanju i definisanju različitih pristupa i tehnika za definisanje fazi sistema pomoću Petrijevih mreža.

Poseban pristup definisanje i za fazi rezonovanje gde je jedna od promenljivih u samom modelu (a inače se posebno definiše i prati) i promenljiva koja prati vreme. Ove Petrijeve mreže nazivaju se i vremenske fazi Petrijeve mreže (*timed fuzzy Petri nets*) i koriste se kod neizvesnosti u određivanju vremenske tačke ili vremena trajanja procesa.

4.6 REZIME

Petrijeve mreže su savremen i efikasan alat za analizu konkurentnih distributivnih sistema. Dijalekti Petrijevih mreža definisani kroz Petrijeve mreže visokog nivoa, kao i dobar izbor softverskih rešenja za Petrijeve mreže omogućavaju laku i efikasnu primenu Petrijevih mreža u simulacionom modeliranju. Iako je najčešća primena Petrijevih mreža u analizi stanja sistema, njihove karakteristike i mogućnost grafičkog pristupa, čini ih jako dobrim alatom za izradu simulacionog modela složenog saobraćajnog sistema. Simulacioni model zasnovan na Petrijevim mrežama mogao bi da iskoristi sve prednosti Petrijevih mreža, rezultujući modelom koji ima odlike modularnosti, hijerarhije, determinizma (ili po potrebi stohastičnosti), neodređenosti (fazi), uz komponentu vremena, a sa rezultatima koji se mogu lako predstaviti (animacija i grafički prikazi) i analizirati.

5 MODELIRANJE KAŠNJENJA VOZOVA

5.1 UVOD

Kašnjenje voza je vreme koje protekne od planiranog do stvarnog prispeća voza. Kašnjenje vozova ima veliki uticaj na red vožnje vozova i na tehnološke procese u železničkom saobraćaju. Model za proračun kašnjenja vozova može se koristiti u planiranju železničkog saobraćaja, izradi reda vožnje vozova, operativnom planiranju saobraćaja i u analizi funkcionisanja saobraćaja. Yuan (*Yuan, 2006*) je predložio analitički stohastički model prostiranja kašnjenja vozova u stanicama koji uključuje moguće zavisnosti zadržavanja vozova u stanicama, stohastičke međuzavisnosti između kretanja vozova na različitim linijama u složenim stanicama, promene brzine u slučaju različitih signalnih znakova staničnih signala, dinamičko prenošenje kašnjenja sa voza na voz i promene redosleda saobraćaja vozova u stanicama. Analitičke metode se brže primenjuju od simulacionih, ali zahtevaju i upotrebu određenih pretpostavki (*Carey i Kwiecinski, 1995*). U fazi planiranja, gde je većina podataka nepouzdana, to nije problem, ali kod detaljnijih analiza, postoji potreba posmatranja određenih saobraćajnih scenarija i podataka za određene vozove ili linije. Rezultati modela kašnjenja vozova mogu se koristiti u simulaciji za analiziranje železničkih mrežnih sistema. U mezoskopskim i makroskopskim modelima, kašnjenje vozova mora biti deo ulaznih podataka za simulaciju. U tom slučaju, dolazna kašnjenja su primarna kašnjenja vozova. Sekundarna kašnjenja mogu se dobiti simulacionim modelom kao rezultat prostiranja kašnjenja kroz sistem.

Metode računarske inteligencije kombinuju elemente učenja, prilagođavanja, evolucije (razvijanja) i fazi logike za razvijanje modela koji su „inteligentni“ u smislu da se kreira struktura iz nestrukturnog početnog stanja. Tehnike računarske inteligencije

koriste numeričke podatke dobijene od senzora ili sličnih metoda za unos podataka. Meko računarstvo se sastoji od fazi logike, neuronskih mreža, genetskih algoritama i ostalih metoda koje se obično kombinuju da bi se razvio model. U modeliranju dolaznih kašnjenja korišćene su i upoređivane tehnike računarske inteligencije: fazi logika, hibridni neuro-fazi sistemi ANFIS (*Jang, 1993*) neuronske mreže.

Zahvaljujući njihovim sposobnostima da uče i generalizuju iz podataka koje obrađuju, neuronske mreže su jako prihvaćene od strane inženjera i istraživača kao alat za obradu podataka. Tehnike računarske inteligencije, kao što su neuronske mreže i hibridni neuro-fazi sistemi, usvojeni su kao istraživački alat u istraživanju saobraćajnih i transportnih problema (*Teodorović, 1998*). *Pribyl (Přibyl i Goulias, 2003)* koristi meko računarstvo za analizu putovanja, a *Sazi Murat (Sazi Murat, 2006)* poredi klasičan analitički pristup kašnjenja vozila sa modelima fazi logike i neuronskih mreža. *Vukadinović (Vukadinovic et al., 1999)* koristi neuro-fazi pristup u problemu raspoređivanja vozila. *Dundar* koristi veštačke neuronske mreže i genetske algoritme za rešavanje konflikata vozova i operativno planiranje reda vožnje vozova (*Dündar i Şahin, 2013*). *Karlaftis (Karlaftis i Vlahogianni, 2011)* poredi najsavremenije statističke modele i modele neuronskih mreža i njihovu primenu u saobraćajnim i transportnim problemima, zaključujući da neuronske mreže imaju prednost nad statističkim metodama u nekim aspektima. Detaljni pregled metoda analiza podataka i detaljni primeri koji obuhvataju različite aspekte saobraćajnih i transportnih problema opisani su u (*Teodorović, 1998*). Metode računarske inteligencije značajno smanjuju proračune kod rešavanja problema i zbog njihove mogućnosti paralelnosti rada, znatno ubrzavaju proces proračuna. Hibridna klasa metoda, hibridni neuro-fazi modeli, koje je razvio (*Jang, 1993*) primenjuju se u raznim oblastima inženjerstva.

Da bi se utvrdili mogući uzroci kašnjenja putničkih vozova, u ovom radu analizirani su podaci koji su prikupljeni na dve stanice beogradskog železničkog čvora: stanica Rakovica i stanica Novi Beograd. Urađene analize ukazuju da mnogi faktori utiču na kretanje vozova. Upravljanje vozovima koji kasne važno je kod planiranja i organizacije saobraćaja vozova. Predstavljene su detaljne analize prikupljenih podataka o kašnjenju vozova i predloženi modeli za proračun kašnjenja vozova na osnovu višestruke linearne regresije i na osnovu tehnika računarske inteligencije. Predloženi modeli testirani su na primeru proračuna dolaznih kašnjenja u stanicu Rakovica.

5.2 KAŠNJENJE VOZOVA

Čak i kod redova vožnje gde su uzeta u obzir sva potrebna ograničenja i pravila, moguće je da negde u sistemu dođe do pojave nepredviđenih okolnosti i da tako nastanu kašnjenja. S obzirom da su kašnjenja interakcije između mnogih slučajnih vrednosti koje se pojavljuju u železničkom sistemu (osoblje ili ljudski faktor, vozila, infrastruktura, vremenske prilike i td.) teško je sprečiti ih. Kašnjenja se mogu podeliti u dve osnovne grupe:

1. Primarna kašnjenja (izvorna kašnjenja) nastaju od poremećaja izazvanih spoljašnjim faktorom koja utiču na kretanje voza (tehnički kvar na infrastrukturi, loši vremenski uslovi, vanredni događaji i td.)
2. Sekundarna kašnjenja (prenesena kašnjenja) nastaju kao posledica kašnjenja drugih vozova (zbog korišćenja istih infrastrukturnih resursa, čekanja na presedanje, poremećaja turnusa vozila i osoblja i td.)

Postoji velika razlika između primarnih i sekundarnih kašnjenja vozova. Primarna kašnjenja se ne mogu uvek izbeći, dok sekundarna kašnjenja zavise od interakcije na železničkoj mreži i sinhronizacije kretanja vozova. Sekundarna kašnjenja postaju veliki problem kada je železnička mreža veoma povezana i kada postoji visoka iskorišćenost propusne moći. Kod ovakvih sistema primarna kašnjenja mogu izazvati domino efekat koji će proširiti kašnjenja na ostale vozove u mreži.

Osnovni razlozi nastanka primarnih kašnjenja su loše stanje infrastrukture i voznih sredstava, tehnički kvarovi, loši vremenski uslovi itd. Uzroci nastanka kašnjenja zavise od opterećenosti i organizacije železničkog sistema. U železničkim sistemima gde postoji veliki broj vozova i velika iskorišćenost propusne moći, uzroci kašnjenja mogu biti i velike varijacije u vremenima bavljenja vozova u stanicama za ulaz i izlaz putnika, ili individualni načini vožnje mašinovođa koji mogu da utiču na kretanje vozova, ili neblagovremeno postavljanje puteva vožnje u stanicama i sl.

Sekundarna kašnjenja vozova najčešće treba očekivati u stanicama i na jednokolosečnim prugama. Najčešći razlog njihovog nastanka su vozovi koji dolaze, prolaze ili odlaze iz stanice na vreme a moraju mogu biti zaustavljeni ako je odsek ispred njih još zauzet vozom koji kasni. Takođe, u stanicama, vozovi mogu imati dodatno čekanje u slučaju kada voz sa kojim se ostvaruje veza presedanja kasni.

U železničkom saobraćaju bezbednost je veoma važna i zbog toga kada dođe do kašnjenja vozova nije moguće smanjiti razmake sleđenja vozova da bi se kašnjenja nadoknadila. To čini železnički sistem veoma osetljivim na poremećaje u redu vožnje. Redovi vožnje su napravljeni tako da u njima ne postoje kašnjenja zbog konflikta trasa vozova. Da bi red vožnje bio stabilniji ili postojaniji na poremećaje (na pr. stabilnost sistema neće biti poremećena ako nastanu mala odstupanja od planiranog reda vožnje) uvode se dodatna vremena. Očigledno je da uvođenjem dodatnih vremena možemo sprečiti širenje poremećaja izazvanih kašnjenjem, ali samo ako su kašnjenja relativno mala. Takav red vožnje podrazumevao bi da vozovi imaju produžena zadržavanja u stanicama da bi eventualna kašnjenja mogla biti nadoknađena. Druga mogućnost je smanjenje broja vozova na određenim linijama čime bi se smanjile mogućnosti prenošenja kašnjenja među vozovima. Obe ove mere dovele bi do značajnog smanjenja kvaliteta saobraćaja u prvom slučaju produženim vremenima vožnje vozova, a u drugom manjim brojem polazaka vozova.

Analiza kašnjenja vozova može biti koristan alat za proveru rada sistema i sagledavanje kvaliteta predloženog reda vožnje za određeni nivo preciznosti. Takođe bi to omogućilo novi kriterijum u izradi reda vožnje gde bi se olakšalo traženje uskih grla i mesta gde najčešće nastaju izazvani i preneseni poremećaji reda vožnje. Kašnjenje vozova je važan element za procenu reda vožnje i ostale tehnološke procese (*Preston et al., 2009*). Veličina kašnjenja vozova je jedan od najvažnijih kriterijuma kod donošenja operativnih i dispečerskih odluka. Operativno planiranje je veoma složeno jer su varijacije u kašnjenju, čak i za iste linije vozova različite od dana do dana i čak i u toku dana, od sata do sata. Deo simulacionih i analitičkih metoda za analizu železničkih sistema su modeli za kašnjenje vozova. Modeli za dolazna kašnjenja vozova su posebno interesantni jer se koriste kao ulazni podaci za asinhronu simulacione modele.

5.3 UZROCI KAŠNJENJA VOZOVA

Uzroci kašnjenja vozova mogu biti poremećaji sa različitim poreklom. Eksterni (spoljni) i interni (unutrašnji) uzroci sa slučajnim varijacijama utiču na železničke saobraćajne procese. Goverde (*Goverde, 2005*) definiše primarno kašnjenje kao odstupanje od planiranog vremena procesa prouzrokovano poremećajem u okviru

procesa. Dolazno kašnjenje je razlika između stvarnog i planiranog vremena dolaska voza u stanicu (Goverde, 2010). Može biti rezultat primarnog ili sekundarnog kašnjenja vozova. Postoje mnogi uzroci dolaznih kašnjenja: tehnički kvar na voznom sastavu, deonice sa laganim vožnjama zbog lošeg stanja pruge, eksterni faktori, i faktori preneti sa drugih vozova koji su imali primarna kašnjenja (u slučaju ukrštavanja vozova, sustizanja vozova, ili zauzetih koloseka i skretnica u stanicama ili na rasputnicama). Ako su slučajne varijacije nastale tehničkim uzrokom ili uticajem okoline ili ljudskim faktorom onda možemo reći da one imaju uobičajeno stohastičko ponašanje.

Najvažniji izvori primarnih kašnjenja mogu se podeliti u četiri osnovne kategorije predstavljene u Tabeli 5.1 (Goverde, 2005).

Tabela 5.1. Osnovni uzroci nastanka primarnih kašnjenja

Oblast	Opis uzroka
Infrastruktura	<ul style="list-style-type: none"> • otkazi opreme, održavanje i otkazi pružnog bloka, skretnica, oštećenja tunela i mostova, naprsnuća šina i sl., • kvarovi kontaktne mreže, • kvarovi signala, sigurnosne opreme, šinskih strujnih kola, brojača osovina i putnih prelaza;
Operatori	<ul style="list-style-type: none"> • kvar lokomotiva i garnitura, kvarovi sistema za kočenje, vrata, kvačila, • postupanje mašinovođa i voznog osoblja, • problemi sa logističkim operacijama, • utovar, istovar i namirivanje, • smetnje izazvane manevarskim operacijama, pranjem i održavanjem vozila i proba kočnica i • problemi izazvani nepredviđenim ponašanjem putnika;
Organizacija saobraćaja vozova	<ul style="list-style-type: none"> • dispozicija, problemi sa kontrolom saobraćaja, komunikacijom ili postavljanjem puteva vožnje, • postupci osoblja koja regulišu saobraćaj, • organizacija saobraćaja u delovima sa uskim grlom, nedostatak voznih sredstava ili osoblja;
Spoljni uticaji	<ul style="list-style-type: none"> • vremenski uticaju kao što su mraz, visoke temperature, loša vidljivost, jak vetar, poplave, snežni nanosi; • neprohodnost pruge, • vanredni događaji na putnim prelazima, životinje ili prepreke na pruzi i samoubistva;

Vreme vožnje vozova između stanica, kao i vreme zadržavanja u stanicama različito je za svako putovanje voza i zavisi od velikog broja faktora koji mogu biti

poreklom iz železničkog sistema ili iz okruženja. Unutrašnji faktori koji najčešće utiču na razlike u vremenima su tehnički kvarovi (loše stanje voznih sredstava i pruge) i uzroci izazvani ljudskim faktorom. Uz to okruženje predstavlja i spoljašnje faktore koji su nepredvidljivi kao na primer vremenske prilike. Ove izvore koji su definisani kao slučajne promenljive je teško prognozirati. Oni utiču da se projektovano vreme vožnje uveća i da uprkos tome što su u proračunu reda vožnje dodata vremena koja nadoknađuju male varijacije, ova vremena mogu biti takva da su van predviđenih okvira. Uzroci koji su definisani kao retki nepredviđeni događaji (incidenti) kao što su kvarovi lokomotiva i oštećenja kontaktnog voda mogu dovesti do jako velikih kašnjenja. Ova kašnjenja imaju drugačiju strukturu i pojavljuju se sa malim verovatnoćama, nisu uobičajena i ne ponavljaju se po nekom određenom obrascu. Sa aspekta statističke analize ovakva kašnjenja definišu se kao ekstremne vrednosti (*outliers*).

Sekundarna kašnjenja su kašnjenja nastala od vozova sa primarnim kašnjenjem. Sekundarna kašnjenja se mogu definisati kao odstupanje od planiranog vremena uzrokovano zbog trasa vozova koje se seku ili čekanjem na voz koji kasni (*Hansen i Pacht, 2008*). Sekundarna kašnjenja su rezultat prostiranja primarnih kašnjenja kroz red vožnje vozova, npr. prenoseći uticaje kašnjenja sa jednog voza na druge. Sekundarna kašnjenja i njihovo prostiranje zavise od primarnih kašnjenja, strukture železničke mreže i reda vožnje vozova.

Na vremena vožnje vozova takođe utiču kašnjenja drugih vozova preko signalno-sigurnosnog sistema pruge (spori prethodni voz ili zauzetost odseka u stanici ili rasputnici), ili zbog predviđenog čekanja na voz u stanici (čekanje na vezu). Trasa voza koji kasni može se tako pomeriti u predviđenom vremenskom prozoru da utiče na kretanje drugog voza i dovesti do kašnjenja tog voza. Pojava sekundarnih kašnjenja može se sprečiti uvođenjem dodatnih rezervnih vremena u red vožnje. Dve osnovne vrste sekundarnih kašnjenja su:

- Kašnjenje vozova zbog konflikata sa trasama drugih vozova. Intenzitet kašnjenja zavisi od signalno sigurnosnog sistema koji se primenjuje u železničkom sistemu i od dodatnih rezervnih vremena koja su predviđena po redu vožnje. Moguće su i druge mere koje zahtevaju izmenu infrastrukture kao što su denivelacija, ugradnja ukrasnica ili povećanje broja koloseka na nekim

deonicama. Za smanjenje sekundarnih kašnjenja moguća je i primena novih sistema sleđenja vozova (sigurnosni sistem sa pokretnim blokom) gde se smanjuje rastojanje između vozova koji se slede.

- Kašnjenje vozova zbog sinhronizacije vozova u stanicama iz tehnoloških razloga ili zbog operacija sa putnicima. Ovo se najčešće dešava kod vozova koji čekaju drugi voz za ostvarenje veze. Kod čekanja na presedanje može doći i do otkazivanja u slučaju kad voz koji se čeka ima veliko kašnjenje, ali ove odluke se donose operativno i od slučaja do slučaja. S druge strane čekanja mogu biti jako velika kada se čeka na kola ili lokomotive da bi se formirao i pokrenuo novi voz čiji sastav zavisi od sastava voza koji se čeka.

Neki od razloga za sekundarna kašnjenja su kašnjenje prethodnog voza na pruzi, konflikt trasa vozova, zauzet peron ili kolosek za prijem i otpremu vozova u stanici, čekanje na voz za presedanje putnika, čekanje na vozna sredstva koja se nalaze u sastavu voza koji kasni i čekanje na osoblje koje se nalazi na vozu koji kasni.

Raspodela kašnjenja

Poznavanje raspodele kašnjenja omogućava analizu prostiranja kašnjenja i samim tim bolju optimizaciju reda vožnje. Stabilan red vožnje mora da apsorbuje manja kašnjenja, ali ne postoji potreba da red vožnje bude izrađen tako da bude stabilan čak i za velika kašnjenja. Drugim rečima red vožnje ne mora da bude stabilan za bilo koje moguće kašnjenje, nego za najčešće slučajeve kašnjenja za koje mora da bude u stanju da ih razreši. U tom smislu potrebno je imati informacije o raspodeli kašnjenja. Mnogi radovi koje su izrađeni na ovu temu pokazali su da su rezultati različiti. Nije moguće direktno uporediti rezultate različitih istraživanja jer su rađeni na različitim uzorcima i u različitim sistemima. Najčešće razlike u istraživanjima su različiti skupovi podataka prikupljeni za različite oblasti i države, različite veličine podataka, zbog velikog broja podataka izvan granice intervala i nedostataka standardizovanih metoda za merenje. Takođe postoji mogućnost da statističke analize ne mogu da daju uvek potpuno precizne odgovore, tj da teorijske raspodele nikada neće savršeno odgovarati empirijskim podacima.

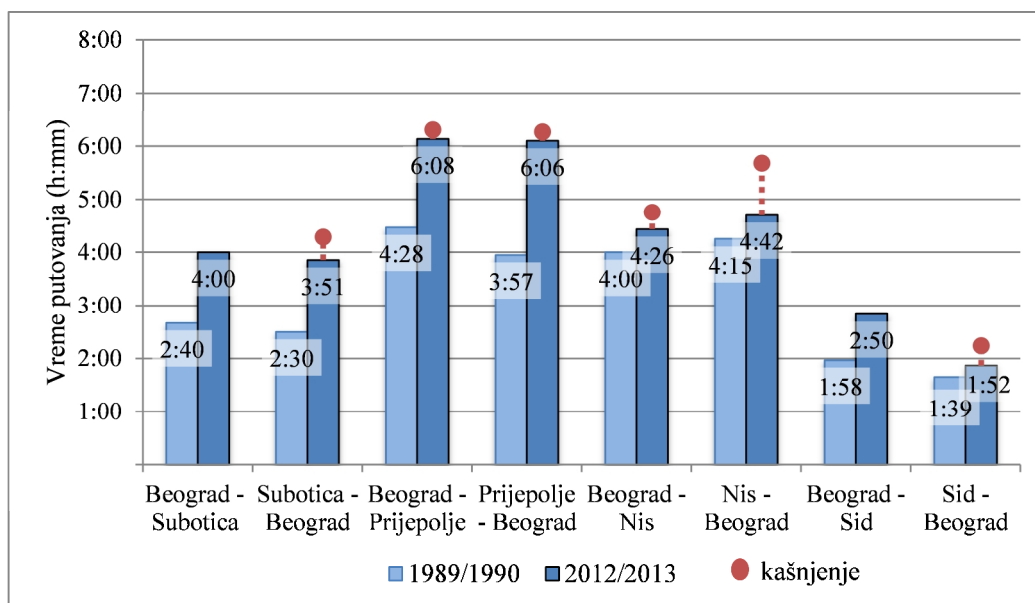
Neki od autora testirali su različite teorijske raspodele za analitičko modeliranje kašnjenja vozova. Schwanhauser (*Schwanhäußer, 1974*) je razvio stohastički pristup

za procenu srednje dužine čekanja kao funkciju raspodele primarnih kašnjenja, dodatnih vremena, rastojanja, redosleda i prioriteta vozova. U ovom modelu razmatra se negativna eksponencijalna raspodela za sekundarna kašnjenja. Wendler (*Wendler i Naehrig, 2003*) je takođe koristio ovu raspodelu za kašnjenja u dolasku i odlasku za vozove nemačkih železnica u oblasti Nirberg. Analize nastajanje kašnjenja na daljinskim putničkim vozovima u široj oblasti Frankfurta (*Herdamm, 1996*) pokazuju da je moguće primeniti hi-kvadrat i Vejbulovu raspodelu za prognozu primarnih kašnjenja i najveći broj izazvanih kašnjenja, dok je gama, negativna eksponencijalna i Erlangova raspodela odbačena za primenu proračuna primarnih i sekundarnih kašnjenja. Sa druge strane (*Higgins i Kozan, 1998*) su koristili negativnu eksponencijalnu i Erlangovu raspodelu za primarna kašnjenja i očekivana sekundarna kašnjenja na železničkoj mreži Australije. Yuan (*Yuan, 2006*) je posmatrao vremena vožnje i kašnjenja na Holandskim železnicama i pokazao da su najbolji rezultati ostvareni primenom Vejbulove raspodele za nenegativna kašnjenja u dolasku, kašnjenja u polasku i kašnjenja zbog nedostajuće veze presedanja. Za raspodelu zauzetosti elemenata pruge koristio je normalnu ili Vejbulovu raspodelu .

Složenost istraživanja kašnjenja vozova zavisi od veza koje postoje između uzroka i posledica: železnički saobraćaj zasnovan je na determinističkim pravilima čiji izbor i primena zavisi od odluka ljudskog faktora. Ove odluke mogu biti različite za slične situacije i mogu izazvati različite efekte na sistem, prema tome identifikacija parametara koji zavise od ljudskog faktora je previše složena da bi se razmatrala.

5.4 KAŠNJENJA VOZOVA NA ŽELEZNICAMA SRBIJE

Na železnicama Srbije, putnički vozovi saobraćaju po redu vožnje, dnevno ponavljajući istu šemu dolazaka i polazaka. Na ovu šemu utiču teretni vozovi koji saobraćaju po trasama između putničkih vozova u skladu sa transportnom potražnjom. Zbog lošeg održavanja mnoge deonice na srpskim železnicama su u takvom stanju, da zbog bezbednosnih razloga, postoje ograničenja brzine. Deonice sa ograničenom brzinom i sa laganim vožnjama smanjuju brzinu kretanja vozova, ograničavaju propusnu moć pruge i generišu kašnjenja vozova.



Slika 5.1 Vremena vožnje vozova za 1989/1990 i 2012/2013

Na primer, na većini pravaca, vremena putovanja su danas veća nego pre 20 godina (Slika 5.1). Na Slici 5.1 prikazano je poređenje vremena vožnje definisanih po redovima vožnji za godinu 1989/1990 i za 2012/2013 na različitim pravcima. U novim redovima vožnje osnovni uzrok uvećanja vremena vožnje su nove deonice na kojima su uvedena ograničenja brzine.

Podaci sa Železnica Srbije ukazuju da postoje mnogi razlozi za kašnjenje vozova (Tabela 5.2). Na Železnicama Srbije kašnjenja vozova se prate preko izveštaja koje kreiraju otpravnici vozova. Za pojedine stanice podaci o kašnjenju vozova se unose u elektronsku bazu podataka. Prikupljanje podataka i kreiranje baza podataka o kašnjenju vozova nije u skladu sa standardom definisanim u fiši UIC 450-2. U Tabeli 5.2 uzroci kašnjenja nisu precizno grupisani i ne daju dovoljno informacija o prirodi uzroka kašnjenja vozova. Na primer, drugi najčešći razlog za kašnjenje vozova definisan u Tabeli 5.2 kao *saobraćajna situacija*, je u stvari sekundarno kašnjenje vozova generisano u mreži.

Zbog lošeg održavanja pruga, deonice sa laganim vožnjama su najčešće razlog za primarno kašnjenje (ovo nije uzrokovano deonicama sa trajnim ograničenjem brzine jer su već uzete u obzir pri izradi reda vožnje). Deonice sa laganim vožnjama izazivaju produženo vreme vožnje i najčešće su uzrok dolaznih kašnjenja vozova. Na Slici 5.1 može se videti da dodatna prosečna kašnjenja povećavaju vreme vožnje vozova za red vožnje 2011/2012. Na primer, medijana i srednja vrednost dolaznih kašnjenja u

Beogradu za voz 336 iz pravca Niša je 44 min i 58 min; za voz 415 iz pravca Šida je 14 min i 22 min, a za voz 541 iz pravca Subotice je 24 min i 26 min.

Tabela 5.2 Statistički podaci o kašnjenju vozova

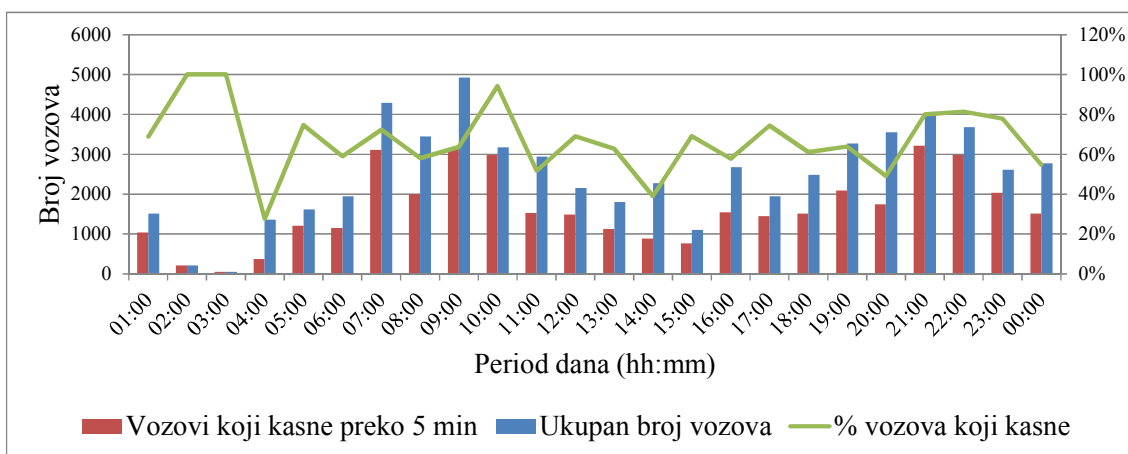
	Uzroci kašnjenja	Opis	% od ukupnog kašnjenja
I	Infrastruktura	Signali APB-a i ostali	8%
		Manevra u stanicama	2%
		Deonice sa laganom vožnjom	35%
		Zatvor pruge	1%
II	Operateri	Saobraćajna situacija	21%
		Pređeni put	7%
III	Vozna sredstva	Čekanje na lokomotivu	6%
		Kvar na lokomotivi	8%
		Otkazan voz	3%
IV	Spoljni uticaj	Vanredni događaji	5%
		Ostalo	5%

izvor: Železnice Srbije

Čak i za mali broj vozova i malu iskorišćenost propusne moći pruga projektovani redovi vožnje nisu u mogućnosti da kompenzuju mnoga kašnjenja. Kombinacija deonica sa laganom vožnjom, nedostatka voznih sredstava i definisanog reda vožnje je uzrok kašnjenja vozova i čini da železnički sistem u Srbiji bude neprecizan i nepouzdan. Veliki poremećaji često utiču na sistem na takav način da dodatna vremena u redu vožnje ne mogu da kompenzuju kašnjenja, pa su potrebna dodatna operativna upravljanja saobraćajem. Zbog specifičnih uslova, važno je analizirati dolazna kašnjenja u stanicama na nivou voznih linija i na nivou pojedinačnih vozova.

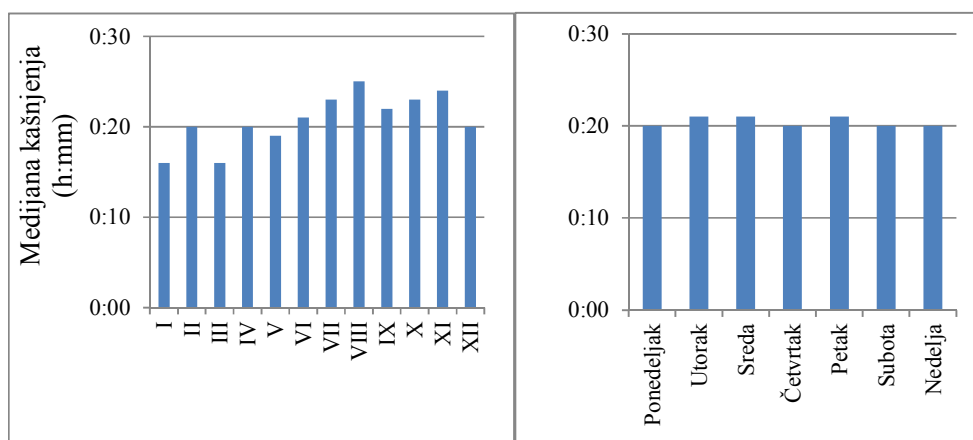
Da bi utvrdili uzroke kašnjenja putničkih vozova analizirani su podaci prikupljeni u stanicama Rakovica i Novi Beograd. Stanica Rakovica nalazi se na južnom delu Beogradskog čvora, a Novi Beograd na severnom. Prikupljeni podaci sadrže podatke o vremenima dolazaka, odlazaka i kašnjenja vozova. Podaci su prikupljeni za sve putničke vozove (međunarodni, regionalni, lokalni i prigradski) i za sve pravce u periodu od januara 2010. do avgusta 2012. Baza prikupljenih podataka sadrži informacije o preko 60000 vozova. Osnovni statistički pokazatelji ukazuju da je

prosečno kašnjenje vozova 30 min sa standardnim odstupanjem od 55 min, prvi kvartil je 1 min, medijana je 12 min, a treći kvartil je 36 min. Od ukupnog broja vozova, 39213 vozova kasni preko 5 minuta, 21181 voz ima kašnjenje manje od 5 min, od čega je 14539 vozova bez ikakvog kašnjenja. Analiza frekvencija dolazaka vozova koji kasne preko 5 min (Slika 5.2) ukazuju da postoje razlike između vozova posmatrajući različite periode dana. Kašnjenja su značajno veća kod vozova koji dolaze za vreme jutarnjeg i po podnevnog/večernjeg vršnog perioda.



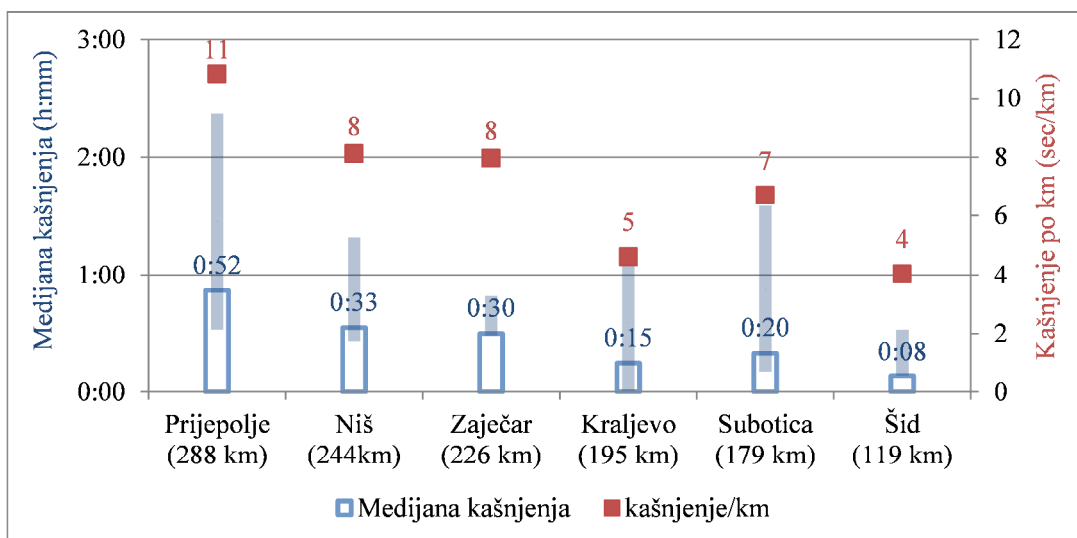
Slika 5.2 Prosečan broj vozova koji kasne po satima u toku dana

Kada se porede kašnjenja po različitim vremenskim periodima (mesečne ili dnevne neravnomernosti), može se zaključiti da ne postoje značajna odstupanja (Slika 5.3). Neke male mesečne varijacije su očekivane, obzirom da dolazi do povećanja broja vozova u letnjim mesecima.



Slika 5.3 Medijana kašnjenja po mesecima i po danima u toku nedelje

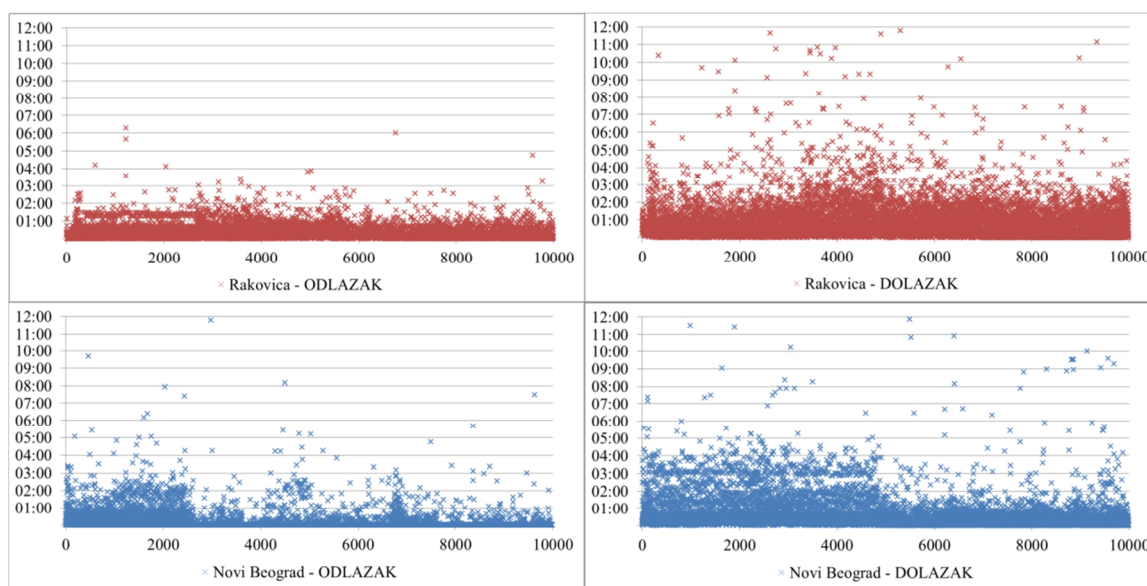
S obzirom da se stanica Rakovica nalazi na južnom delu čvora pored ranžirne stanice, teretni vozovi koji idu ka ranžirnoj stanici sa juga, severa i zapada ne prolaze kroz stanicu Rakovica, ali koriste dve rasputnice koje se nalaze u nadležnosti stanice. Rasputnice na dvokolosečnoj pruzi sa obe strane stanice imaju veliki uticaj na saobraćaj vozova i potencijalni su izvor poremećaja i kašnjenja vozova i osnovni uzrok nastanka sekundarnih kašnjenja u tom delu čvora. Teretni vozovi saobraćaju po potrebi, a po prethodno utvrđenim trasama tako da je teško utvrditi njihovo očekivano vreme dolaska. Zbog toga je ovo istraživanje kašnjenja usmereno samo na putničke vozove jer oni saobraćaju po unapred utvrđenom redu vožnje. Stanica Novi Beograd nalazi se na dvokolosečnoj pruzi iz Beograd Centra ka Zemunu, ali je i odvojna stanica za jednokolosečnu prugu za stanicu Beograd. Ove kompleksne veze i kombinacije jednokolosečnih i dvokolosečnih pruga su, takođe, mogući uzrok (sekundarnih) kašnjenja. Poređenje železničkih linija po pravcu i po rastojanju ukazuje na još jedan mogući uzrok kašnjenja (Slika 5.4). Na Slici 5.4 vidi se razlika u kašnjenju vozova za vozove koji dolaze sa različitih delova mreže.



Slika 5.4 Medijana sa interkvartilnim opsegom kašnjenja po pravcima

Analize u Rakovici i Novom Beogradu nagoveštavaju da postoji značajno neslaganje u prosečnim kašnjenjima posmatrajući pravce dolazaka vozova (Slika 5.5). Medijana kašnjenja vozova koji napuštaju čvor u Rakovici je 10 min (srednje vreme je $\bar{x} = 16$ min), a 0 min ($\bar{x} = 12$ min) u Novom Beogradu. Vozovi koji dolaze u čvor

imaju medijanu kašnjenja od 14 min ($\bar{x} = 33$ min) u Novom Beogradu i 37 min ($\bar{x} = 56$ min) u Rakovici. Na Slici 5.5 uočljivi su periodi sa povećanim kašnjenjem. Razlog je promena u saobraćaju vozova zbog poremećaja nastalih tokom rekonstrukcije mosta Gazela. Kod kašnjenja vozova u odlasku ka jugu, primećuje se redovno kašnjenje vozova u određenom opsegu. Pruga od stanice Beograd Glavna do Rakovice je u lošem stanju sa mnogim laganim vožnjama, tako da skoro svi vozovi na deonici Beograd – Rakovica imaju kašnjenja u sličnom opsegu. Za vozove u dolasku u čvoru primetno je da postoji mnogo veće rasipanje podataka. Na kašnjenje tih vozova moglo je uticati više različitih parametara koji su vezani za relaciju, prugu sa koje dolaze i kategoriju voza. Iako su podaci iz perioda u koje postoje različiti neuobičajeni (eksterni) uzroci kašnjenja vozova, iz analize dolazaka vozova u stanice može se uočiti da se kašnjenje vozova ponaša po obrascima koji se ponavljaju.



Slika 5.5 Kašnjenje vozova po smerovima (u satima)

Za detaljnu analizu kašnjenja vozova prikupljeni su podaci o saobraćaju vozova u stanici Rakovica u beogradskom železničkom čvoru. Podaci su uzeti za saobraćaj vozova u toku meseca jula 2010. godine za 31 dan. Mesec jul je izabran kao mesec sa najvećim brojem vozova. Podaci su prikupljeni za 3710 vozova svih kategorija: međunarodni putnički, unutrašnji putnički, prigradski i regionalni putnički, međunarodni teretni, direktni teretni, sabirni teretni i ostali vozovi. U toku 31 dana bilo

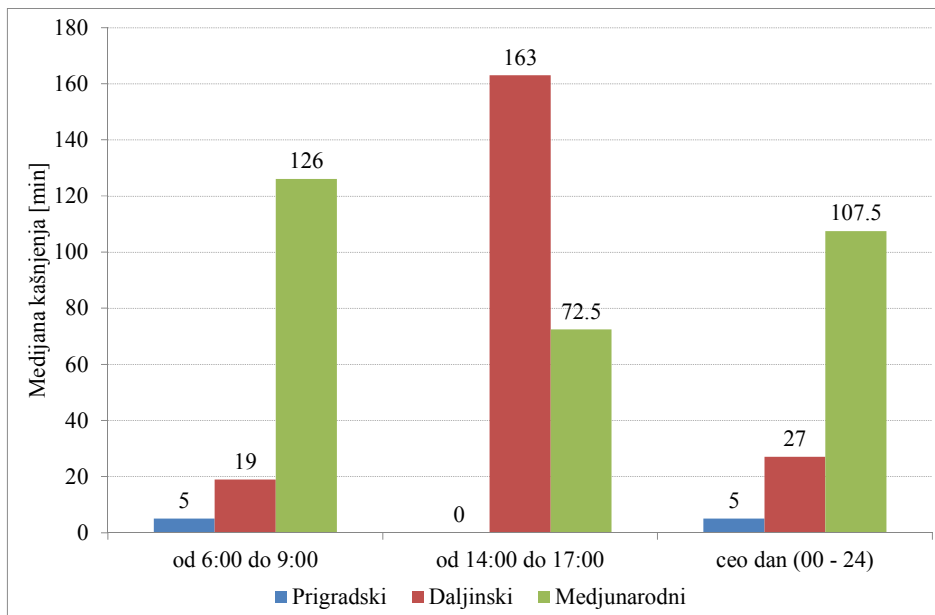
je 826 teretnih vozova i 427 ostalih vozova koji su se pojavili van planiranog reda vožnje. Teretni vozovi saobraćaju po dnevnom operativnom redu vožnje i zato je teško utvrditi njihova očekivana vremena dolazaka u stanicu. Putnički vozovi koji prolaze kroz stanicu Rakovica su daljinski vozovi koji dolaze/odlaze u pravcu juga i vozovi koji saobraćaju u sistemu prigradskog putničkog saobraćaja „Beovoz“. Tokom mesec dana istraživanja, posebno su posmatrani vozovi koji se kreću u različitim smerovima, tj. posebno su analizirani vozovi ka jugu (ka Resniku), a posebno ka severu (ka Beogradu). Ka severu je analizirano: 325 prigradskih, 412 daljinskih i 212 međunarodnih vozova. Broj vozova ka jugu je: 325 prigradskih, 394 daljinskih i 264 međunarodna voza. Razlika u broju vozova po smerovima javlja se jer su tokom jula 2010. godine neki daljinski vozovi koristili alternativne pravce zbog radova na održavanju pruge i zbog otkazivanja vozova (kvarovi lokomotiva).

Tabela 5.3 Pokazatelji dolaznih kašnjenja putničkih vozova ka severu u Rakovici

Parametar	Vrednost	Percentil	Vrednost
Veličina uzorka	760	Min	0 min
Opseg (maksimalno)	178 min	5%	0 min
Srednja vrednost kašnjenja	43.01 min	10%	0 min
Varijansa kašnjenja	2251	25% (Q1)	5 min
Standardno odstupanje	47.4 min	50% (Medijana)	22 min
Koeficijent asimetrije	1.1	75% (Q3)	71 min

Nakon statističke obrade uzorka i nakon uklanjanja ekstremnih vrednosti (*outliers*), za izabrani uzorak od 760 snimljenih vozova u Tabeli 5.3 možemo da vidimo da je srednje vreme dolaznog kašnjenja 43 minuta, a medijana kašnjenja je 22 min, što je jako visoko kašnjenje. Visoke vrednosti standardnog odstupanja i vrednosti percentila ukazuju da postoji veliki broj velikih kašnjenja. Na primer, čak 44% svih vozova ima dolazno kašnjenje koje je veće od 30 minuta, a 29% vozova ima kašnjenje koje je veće od jednog sata. Samo 16% vozova dolazi „na vreme“, odnosno njihovo dolazno vreme se razlikuje za manje od tri minuta u poređenju sa planiranim vremenom dolaska. U Tabeli 5.3 podaci o koeficijentu asimetrije i interkvartilni opseg ukazuju da raspodela podataka nije simetrična. Iz tog razloga, za opis i poređenje rezultata koristiće se medijana kao vrednost centra raspodele jer predstavlja tipičnog predstavnika populacije.

Analiza podataka po periodima u toku dana (Slika 5.6), ukazuje na značajne razlike u kašnjenju po kategorijama vozova i po periodu u toku dana. Ovo se može objasniti činjenicom da neke linije vozova imaju ekstremna kašnjenja koja se često ponavljaju.



Slika 5.6 Prosečna dolazna kašnjenja u Rakovici po period dana

Kada se analiziraju podaci o pređenom putu kod vozova ka severu, a koji imaju kašnjenja u dolasku u stanicu Rakovica, može se zaključiti da je kod vozova koji su prešli više od polovine ukupnog puta, medijana dolaznog kašnjenja je oko 43 minuta. Vozovi koji su prešli manje od polovine ukupnog puta imaju medijanu kašnjenja od oko pet minuta.

5.5 PREDLOG MODELA ZA PRORAČUN KAŠNJENJA VOZOVA

Statistička analiza dolaznih kašnjenja sugerise da mnogi faktori utiču na kašnjenje vozova i da postoje jako veliki poremećaji u sistemu. Prognoza kašnjenja vozova je veoma teška jer postoji puno faktora koje treba sagledati. Kao što je ranije navedeno, postoje analitički modeli koji računaju dolazno kašnjenje vozova koji daju dobre rezultate za železničke sisteme sa malim poremećajima. Kada postoje veliki i česti poremećaji, kao što je to slučaj u beogradskom železničkom čvoru, postoji potreba za modelom kašnjenja vozova koji se lako može prilagoditi za svaku pojedinačnu stanicu u

sistemu. Za potrebe prognoziranja kašnjenja vozova u ovom radu su formirana četiri modela. Prvi je zasnovan na fazi logici (*fuzzy logic-FL*), drugi model je zasnovan na adaptivnom neuro-fazi modelu (*Adaptive Network Fuzzy Inference System-ANFIS*), treći model zasnovan je na višestrukoj linearnoj regresiji (VLR) i četvrti model koristi veštačke neuronske mreže (*Neural Networks-NN*). Model zasnovan na fazi logici definisan je za prognozu kašnjenja vozova u slučaju kada ne postoje podaci o radu sistema, tj. kada se ne može doći do podataka o prethodnim kašnjenjima vozova. Prema tome, pri izradi modela FL ne koriste se podaci o prethodnim kašnjenjima u beogradskom železničkom čvoru, već se koriste podaci dobijeni anketiranjem otpravnika vozova i (saobraćajnih) dispečera. U tom slučaju, koriste se iskustva i znanja železničkog osoblja koje je dobro upoznato sa radom sistema.

5.6 PRIPREMA PODATAKA ZA IZRADU MODELA KAŠNJENJA VOZOVA

Istraživanje kašnjenja vozova testirano je na podacima prikupljenim u stanici Rakovica. Model dolaznih kašnjenja u stanici Rakovica urađen je kao primer kojim se testira pristup modeliranju kašnjenja vozova pomoću neuronskih mreža i ANFIS modela. Podaci su filtrirani i pripremljeni u formatu koji je potreban za primenu u NN, VLR i ANFIS modelima. Posmatrani su samo putnički vozovi u stanici Rakovica koji se kreću na sever ka Beogradu. Podaci su odabrani za 760 putničkih vozova koji su saobraćali tokom jula 2010. godine. Različiti faktori utiču na pojavu dolaznih kašnjenja i neki od njih imaju jak uticaj. Prvo, kategorija voza i prosečno vreme kašnjenja imaju jaku zavisnost (Slika 5.6). Postoje značajne varijacije kašnjenja čak i kod istih kategorija vozova kada se posmatraju različiti periodi dana. Sledeći važan parametar koji je u direktnoj vezi sa kašnjenjem je pređeni put voza. Sa porastom pređenog puta postoji veća verovatnoća da voz kasni kao posledica uticaja primarnih ili sekundarnih uzroka kašnjenja. Tokom prikupljanja podataka i kroz razgovor sa otpravnicima vozova i dispečerima sugerisan je još jedan faktor: parametri pruge i stanja pruge na posmatranoj liniji. Specifični uslovi na prugama Železnicama Srbije su takvi da neki delovi mreže ili neki delovi pruge imaju značajan broj deonica sa laganim vožnjama;

neke pruge su u dobrom stanju i vozovi se kreću maksimalnim brzinama; postoje jednokolosečne i dvokolosečne pruge; postoji dosta rasputnica itd. Očigledne su razlike kada se posmatraju i porede parametri različitih pruga. Analiza dolazaka vozova sa nekoliko različitih pruga (Slika 5.4) pokazuje da su prosečna kašnjenja po kilometru razlikuju u zavisnosti od pruge. Na primer, medijana kašnjenja vozova iz pravca Prijepolja je 11 sekundi po kilometru, a iz pravca Šida je 4 sekunde po kilometru. Ove vrednosti najviše zavise od stanja pruge i uticaja deonica sa laganim vožnjama i one se ne menjaju u dužim vremenskim periodima. Zbog toga, otpravnici vozova prepoznaju obrasce ponašanja sistema saobraćaja vozova. Da bi se procenio uticaj infrastrukture na kašnjenje vozova urađena je anketa otpravnika vozova. Pomoću njihovog znanja i poznavanja ponašanja sistema, otpravnici mogu da ocene koliki je mogući uticaj infrastukture na kašnjenje vozova na toj pruzi. Nakon analize saobraćajnih uslova i podataka prikupljenih za vreme istraživanja, zaključeno je da ulazni podaci za definisanje modela kašnjenja vozova imaju sledeće parametre:

1. Prioritet voza; Prioritet voza najčešće zavisi od kategorije voza i može se numerički izraziti preko broja voza.
2. Vreme dolaska u stanicu; Vreme dolaska je normalizovani broj koji predstavlja vreme u toku dana kada je određeni voz stigao u stanicu.
3. Pređeni put; Pređeni put voza je numerička vrednost definisana procentom putovanja koje je završeno ili rastojanjem koje je pređeno do dolaska voza u stanicu sistema.
4. Uticaj infrastrukture; Normalizovana vrednost koja opisuje uticaj infrastrukture na kašnjenje. Podaci su proračunati za svaku liniju voza u zavisnosti od specifičnih uslova na pruzi na kojoj saobraća voz.

5.7 MODEL PRORAČUNA KAŠNJENJA VOZOVA ZASNOVAN NA FAZI LOGICI

Teorija fazi skupova predstavlja pogodan matematički aparat za modeliranje različitih procesa u kojima dominira neizvesnost, višeznačnost, neodređenost, itd.

(Teodorović i Šelmić, 2012), što je čini veoma pogodnom za modeliranje kašnjenja vozova. Kada ne postoji podaci o prethodnim kašnjenjima vozova ili kada su oni teško dostupni, model se može definisati korišćenjem lingvističkog opisa posmatranih promenljivih. U takvim slučajevima, u radu se predlaže model za proračun kašnjenja vozova zasnovan na fazi logici. Fazi logika kao osnova fazi sistema omogućuje donošenje odluka i na osnovu nepotpunih informacija, a modeli zasnovani na fazi logici se sastoje od tzv. IF - THEN pravila.

Ulazne promenljive u fazi sistemima predstavljaju lingvističke promenljive kojima se opisuju uslovi u kojima saobraća voz. Izlazni rezultat fazi logike se defazifikuje, tj. sagledavajući sve stepene pripadnosti vrši se izbor jedne vrednosti izlazne promenljive.

Vrednosti parametara fazi modela definišu se u saradnji sa saobraćajnimdispečerima i ekspertima koji su upoznati sa radom sistema. Njihovo znanje i iskustvo kao i uvid u statistiku kašnjenja vozova koristi se za definisanje ulaznih veličina, baza pravila i izlaznih veličina. Lingvistički opisi rada sistema prikupljaju se od eksperata pomoću anketa i zatim se pomoću *Delphi* metode obrađuju. Rezultati ankete su usaglašeni i normalizovani su parametri koji se koriste za opis ulazno/izlaznih promenljivih u fazi sistemu.

Model fazi sistema može se definisati sa 4 ulazne promenljive: kategorija voza, vreme dolaska, pređeni put voza i uticaj infrastrukture. Ipak, s obzirom da se pri definisanju modela ne raspolaže preciznim podacima (dobijenim snimanjem ili iz baza podataka), već lingvističkim nepreciznim opisom, dovoljno je ovaj model definisati sa tri ulazne promenljive: prioritet (kategorija) voza, uticaj reda vožnje i infrastrukture, pređeni put voza.

1. **Prioritet voza.** Ova promenljiva opisuje prioritet posmatranog voza, a samim tim ukazuje i na karakteristike i okolnosti pri kojim saobraća. Postoji visoka zavisnost između kategorije voza, prioriteta voza i verovatnoće kašnjenja voza. Definisana je ocenom od 0 do 10 gde se date numeričke ocene mogu objasniti i lingvistički: najmanja ocena je 0 kojom se opisuje najniži prioritet voza (μ_{pn}), ocena 5 je za srednji prioritet voza (μ_{ps}), a ocena 10 je za voz visokog prioriteta (μ_{pv}). Najčešće se prioriteti vezuju direktno za kategoriju voza, pa tako teretni vozovi saobraćaju kao

vozovi sa najnižim, a međunarodni putnički kao vozovi sa najvišim prioritetom. U nekim slučajevima, vozovima se može dodeliti viši prioritet ako to zahteva saobraćajna situacija i uslovi vuče (veza zbog presedanja, uticaj na sekundarna kašnjenja, vuča vozova velike mase na kritičnim usponima itd.). Funkcija pripadnosti fazi skupa kojom je opisan prioritet voza je:

$$\mu_{pn}(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ \frac{4-x}{4}, & 0 \leq x \leq 4 \\ 0, & x \geq 4 \end{cases} \quad \mu_{ps}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ \frac{x-1}{4}, & 1 \leq x \leq 5 \\ \frac{9-x}{4}, & 5 \leq x \leq 9 \\ 0, & x \geq 9 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\mu_{pv}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 6 \\ \frac{x-6}{4}, & 6 \leq x \leq 10 \\ 1, & x = 10 \end{cases}$$

2. **Uticaj reda vožnje i infrastrukture.** Promenljiva kroz normalizovanu ocenu prikazuje uticaj definisanog reda vožnje i uticaj karakteristika pruge (infrastrukture) sa koje dolazi voz. Uticaj reda vožnje posmatra se kroz njegove karakteristike: heterogenost reda vožnje, broj, frekvencija i kategorije vozova. Uticaj infrastrukture zavisi od sledećih elemenata: stanje pruge, dužina laganih vožnji (deonica sa ograničenom brzinom), broj rasputnica, broj stanica, vrsta osiguranja, itd. Ocena uticaja reda vožnje i infrastrukture je opisna (0 – 10), gde je sa 0 dat vrlo mali uticaj (μ_{im}), a sa 10 (μ_{iv}) najveći uticaj na kašnjenje voza. Funkcija pripadnosti fazi skupa fazi promenljivu definiše kao:

$$\mu_{im}(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ \frac{10-x}{10}, & 0 \leq x \leq 10 \\ 0, & x = 10 \end{cases} \quad \mu_{iv}(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ \frac{x}{10}, & 0 \leq x \leq 10 \\ 1, & x = 10 \end{cases} \quad (5.2)$$

3. **Pređeni put voza.** Što je veći pređeni put voza veća je verovatnoća da se pojave kašnjenja voza. Granice ovog fazi skupa definišu se na osnovu iskustva i analize baze podataka o kašnjenju vozova. Funkcija pripadnosti skupa za pređeni put voza definisana je sa tri fazi skupa: mali (μ_{ppm}), srednji (μ_{pps}) i veliki pređeni put (μ_{ppv}). Funkcija pripadnosti fazi skupa kojom je opisan pređeni put voza je:

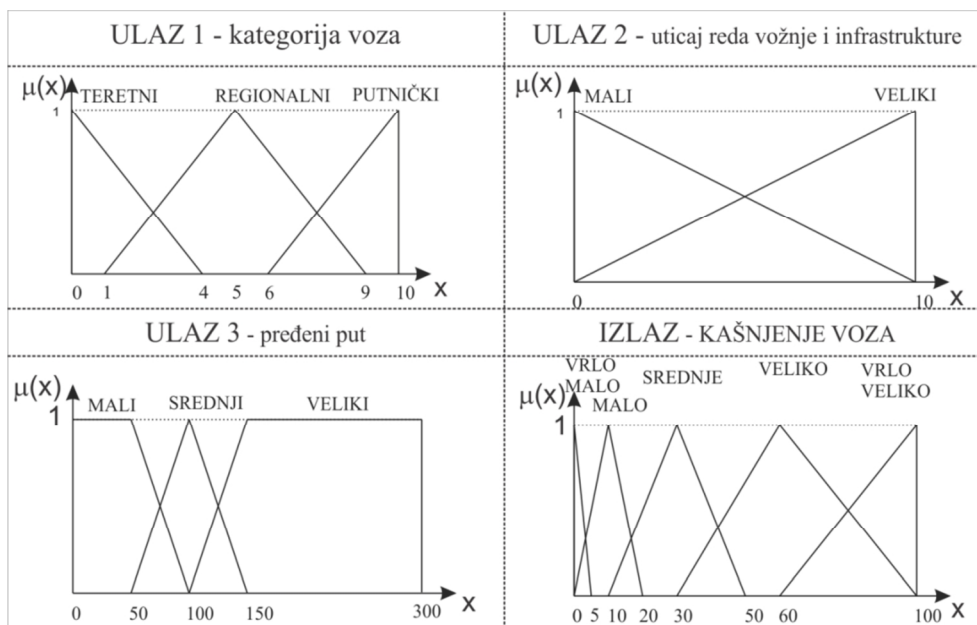
$$\begin{aligned}
\mu_{ppm}(x) &= \begin{cases} 1, & x \leq 50 \\ \frac{100-x}{50}, & 50 \leq x \leq 100 \\ 0, & x \geq 100 \end{cases} \\
\mu_{pps}(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 50 \\ \frac{x-50}{50}, & 50 \leq x \leq 100 \\ \frac{150-x}{50}, & 100 \leq x \leq 150 \\ 0, & x \geq 150 \end{cases} \\
\mu_{ppv}(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 100 \\ \frac{x-100}{50}, & 100 \leq x \leq 150 \\ 1, & x \geq 150 \end{cases}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Funkcije pripadnosti fazi skupova koji opisuju izlaznu promenljivu – „kašnjenje voza“ definisane su sa 5 fazi skupova i to: vrlo malo (μ_{Kvm}), malo (μ_{Km}), srednje (μ_{Ks}), veliko (μ_{Kv}) i vrlo veliko kašnjenje (μ_{Kvv}). Funkcije pripadnosti skupova su:

$$\begin{aligned}
\mu_{Kvm}(x) &= \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{5-x}{4}, & 0 \leq x \leq 5 \\ 0, & x \geq 5 \end{cases} & \mu_{Km}(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{10}, & 0 \leq x \leq 10 \\ \frac{20-x}{10}, & 10 \leq x \leq 20 \\ 0, & x \geq 20 \end{cases} \\
\mu_{Ks}(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 10 \\ \frac{x-10}{20}, & 10 \leq x \leq 30 \\ \frac{30-x}{20}, & 30 \leq x \leq 50 \\ 0, & x \geq 50 \end{cases} & \mu_{Kv}(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 30 \\ \frac{x-30}{30}, & 30 \leq x \leq 60 \\ \frac{100-x}{40}, & 60 \leq x \leq 100 \\ 0, & x \geq 100 \end{cases} \\
\mu_{Kvv}(x) &= \begin{cases} 0, & x \leq 60 \\ \frac{x-60}{40}, & 60 \leq x \leq 100 \\ 1, & x \geq 100 \end{cases}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

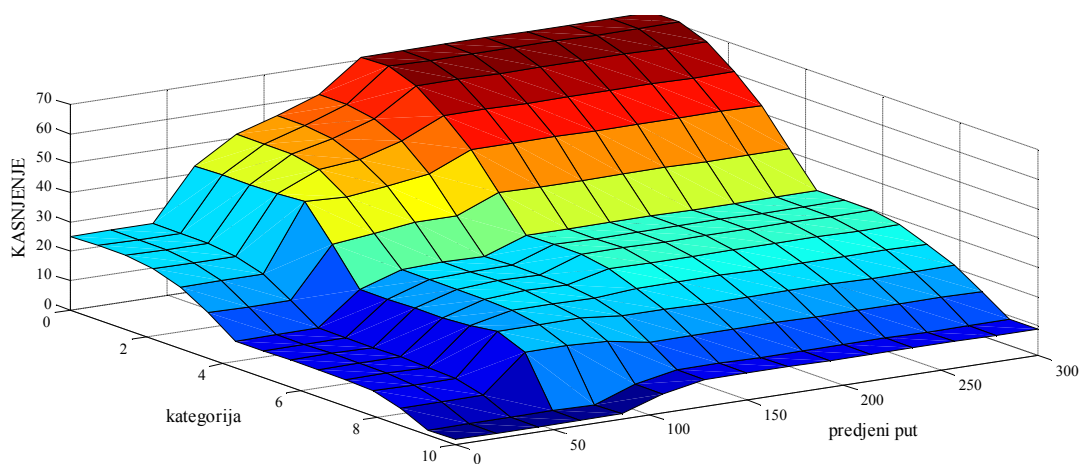
Prioritet (kategorija) voza ima jak uticaj na verovatnoću kašnjenja voza. Uticaj parametara infrastrukture i karakteristike reda vožnje u ovom modelu su uključene kroz parametar nazvan uticaj reda vožnje. U uticaju reda vožnje i infrastrukture objedinjeni su efekti vremena dolaska voza, tipa lokomotive, lokalni uslovi, tehnološka rešenja, principi bezbednosti i sleđenja vozova i vremenski uticaj na kašnjenje voza. Kod parametra pređeni put voza, uzima se u obzir uticaj dužina trajanja vožnje na verovatnoću kašnjenja voza. Primer funkcija pripadnosti fazi skupova za tri ulazne

promenljive (kategorija voza, uticaj reda vožnje i pređeni put voza) za jednu stanicu u Beogradskom železničkom čvoru prikazan je na Slici 5.7.



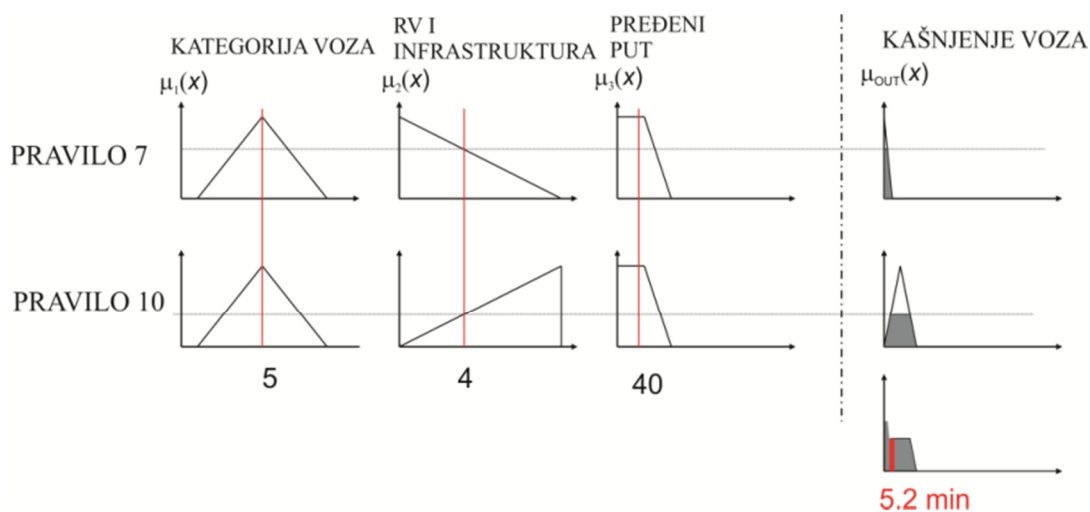
Slika 5.7 Funkcija pripadnosti fazi skupova ulaznih i izlazne promenljive

Proces donošenja zaključaka na osnovu fazi pravila, činjenica i njihovog značenja naziva se fazi rezonovanje (*fuzzy inferencing*) a ceo sistem – fazi sistem rezonovanja ("*fuzzy inferencing system*" – FIS). Fazi pravilima, ulazne fazi promenljive preslikavaju se u izlazne fazi promenljive. Na Slici 5.8, prikazano je kašnjenje vozova u zavisnosti od dve izabrane ulazne fazi promenljive: kategorije (prioriteta) voza i pređenog puta voza.



Slika 5.8 Kriva zavisnosti ulaznih i izlazne fazi promenljive

Baza pravila sastoji se od 18 pravila kod kojih je težinski faktor 1. Logički operator AND se koristi za MIN (pravilo minimuma za AND relacije). Pri kreiranju konsekventnog fazi skupa koristi se MAX-MIN kompozicija. Defazifikacija izlaznog fazi skupa vrši se modifikovanom metodom centra gravitacije koja naglašava rezultate defazifikovanog marginalnog kombinovanog izlaza. Testirane su različite metode defazifikacije (metoda centroid ili centar gravitacije, metoda sredine maksimuma i bisektor) i rezultati pokazuju da ove metode nisu dale očekivanje rezultate. Metoda centra gravitacije daje precizne rezultate kod velikih kašnjenja vozova, ali javljaju se odstupanja od stvarnih podataka u slučaju malih i veoma malih kašnjenja. Naime, metoda centra gravitacije nije dala dobre rezultate za najniže izlazne vrednosti (veoma mala kašnjenja) i nema mogućnost da da nulte vrednosti kašnjenja. Prema tome, predlaže se modifikovana metoda centra gravitacije gde se marginalne vrednosti za mala kašnjenja računaju po linearnoj funkciji pripadnosti krajnje levog fazi skupa (fazi skup veoma malog kašnjenja). Na primer, numerička vrednost ima vrednost desne granice funkcije pripadnosti kada je izlazna vrednost fazi skupa B_I data vrednošću $\mu_B(x) = 1$, a numerička vrednost je 0 za $\mu_B(x) = 0$.



Slika 5.9 Primer proračuna kašnjenja aproksimativnim rezonovanjem MAX-MIN kompozicijom

Primer proračuna kašnjenja vozova koristeći dva pravila predstavljen je na Slici 5.9. Primer je zasnovan na sledećim ulaznim parametrima:

- Kategorija (prioritet) voza – 5 (regionalni voz);
- Uticaj reda vožnje i infrastrukture – ocena 4 (na skali 1 do 10);
- Pređeni put voza – 40 km.

Pravila 7 i 20 su primenjena na ove ulazne parametre. Defazifikacijom izlaznog fazi skupa dobijeno je kašnjenje voza koje iznosi 5,2 minuta.

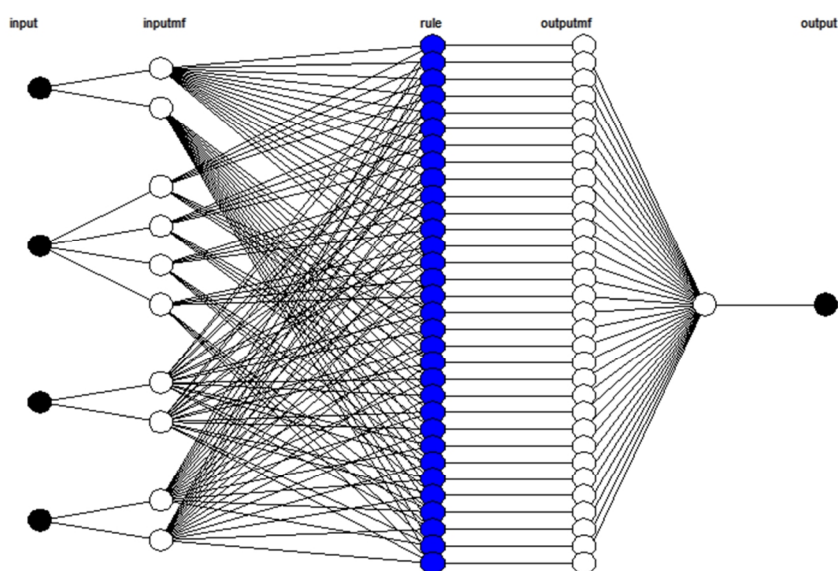
5.8 ADAPTIVNI NEURO-FAZI MODEL PROGNOZE

KAŠNJENJA VOZOVA

Jedna od osnovnih karakteristika neuronskih mreža je da uče iz podataka, dok fazi logički sistemi imaju sposobnost da tumače rezonovanje na bazi nepreciznih podataka tako da budu korisni u donošenju mogućih odluka. Pored numeričkih podataka, u neuro-fazi sisteme mogu biti uključene i lingvističke informacije. Hibridni modeli računarske inteligencije kombinuju različite tehnike, kao što su neuronske mreže i fazi logika u adaptivne mrežne fazi sisteme koje je definisao (*Jang, 1993*)- *Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems* (ANFIS). Osnovna ideja neuro adaptivnih tehnika učenja bazirana je na modeliranju i metodama učenja iz datog skupa podataka. Računanje parametara funkcije pripadnosti se obavlja tako da je odgovarajući sistem fazi rezonovanja (*Fuzzy Inference System – FIS*) najbolji, tj. sa najmanjom greškom za odgovarajući skup ulazno-izlaznih podataka. Ova metoda učenja je slična metodi učenja koja se primenjuje u neuronskim mrežama. Koristeći dati skup ulazno-izlaznih podataka sistem formira sistem fazi rezonovanja gde se parametri podešavaju koristeći *backpropagation* algoritam ili u kombinaciji sa metodom najmanjeg kvadrata greške. Ovaj pristup omogućava da sistem uči iz podataka koje modelira. Parametri koji karakterišu odgovarajuće funkcije pripadnosti menjaju se kroz proces obučavanja. Najčešći pristup je korišćenje Takagi-Sugeno tipa fazi modela sa diferencijabilnim operatorima i neprekidno diferencijabilnom funkcijom pripadnosti za kreiranje mehanizma fazi rezonovanje i sa defazifikatorom sa srednjim težištem za defazifikaciju izlaznih fazi skupova (*Palit i Popovic, 2005*). Odgovarajuće fazi rezonovanje može biti predstavljeno u *feedforward* višeslojnoj mrežnoj strukturi. Sposobnost učenja neuronskih mreža može da automatizuje ovaj proces. Svi fazi parametri se automatski određuju algoritmom obučavanja. Funkcije pripadnosti se podešavaju sa parametrima neuro-fazi mreže.

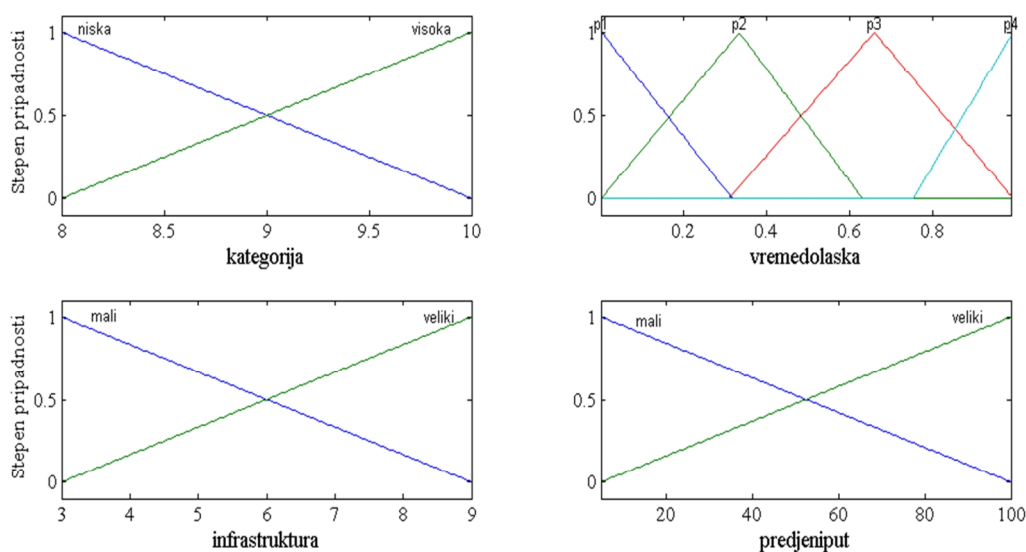
Adaptivni neuro-fazi model koristi parove ulazno-izlaznih podataka dobijenih snimanjem na terenu ili iz postojećih baza podataka o kašnjenjima vozova. Svaki voz koji je kasnio i za koji su prikupljeni podaci predstavljen je skupom podataka koji opisuju njegovu kategoriju, vreme dolaska u stanicu, uticaj infrastrukture (kroz normalizovanu vrednost ocene pruge) i pređeni put. Definisani ulazni podaci za svaki voz povezani su podatkom o njegovom kašnjenju, čime smo definisali i ulazno-izlaznu vezu koja će se koristiti u obučavanju neuro-fazi modela.

Skup postojećih ulazno-izlaznih parova podataka podeljen je na slučajan način na tri grupe za: trening, validaciju i testiranje neuro-fazi modela. Parovi ulazno-izlaznih podataka koriste se za proračun fazi skupova kod Takagi – Sugeno fazi logičkog sistema.



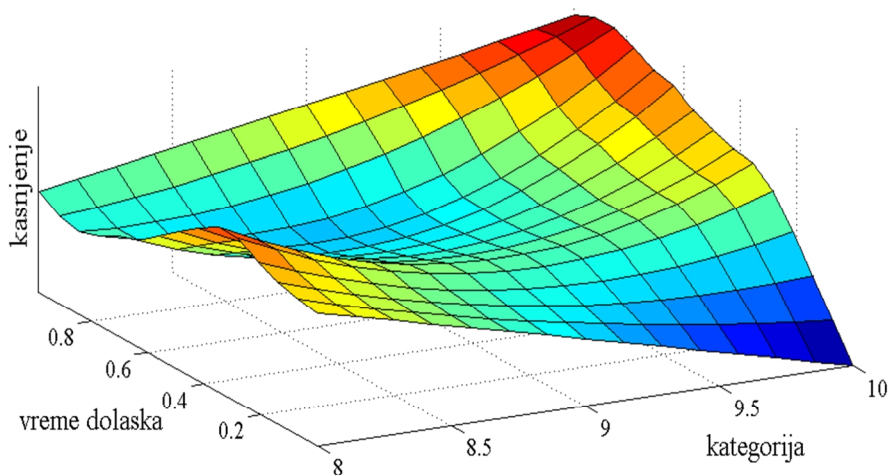
Slika 5.10 Struktura ANFIS modela

Definisane su četiri ulazne promenljive, pri čemu su kategorija (prioritet voza), uticaj infrastrukture i pređeni put definisani sa po dve funkcije pripadnosti fazi skupa, a ulazna promenljiva vreme dolaska sa četiri kategorije opisane fazi skupovima (zbog uticaja jutarnjeg i popodnevnog/večernjeg špica vreme u toku dana je podeljeno na četiri perioda). Model fazi sistema treniran je metodom *backpropagation optimizacije*. Slika 5.10 pokazuje strukturu ANFIS modela, a na Slici 5.11 prikazane su funkcije pripadnosti fazi skupova ulaznih i izlazne promenljive.



Slika 5.11 Funkcije pripadnosti fazi skupova izlazne i ulaznih promenljivih

Dobijeni rezultati nakon obuke neuro-fazi ANFIS modela pokazuju da su, u poređenju sa stvarnim kašnjenjem vozova, rezultati ANFIS modela: koeficijent korelacije R je 0,889, sa srednjom vrednošću greške MAE (*mean absolute error*) od 13,40 min, sa prosečnim kašnjenjem vozova od 41,9 min i sa standardnom devijacijom od 43,9min.



Slika 5.12 Odnos izlaznih i ulaznih promenljivih

Na Slici 5.12 predstavljene su ulazne promenljive i trodimenzionalni graf zavisnosti kašnjenja u odnosu na variranje ulaznih parametara kategorija voza i vreme dolaska.

5.9 MODEL VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE ZA PRORAČUN KAŠNJENJA VOZOVA

Neuronske mreže su složeni paralelni, distribuirani sistemi za obradu koji predstavljaju novu računarsku tehnologiju zasnovanu na analogiji sa ljudskim sistemom za obradu podataka. Neuronske mreže se obučavaju da obavljaju određene funkcije tako što se podešavaju vrednosti veza (težina) između elemenata. Podaci koji se razmenjuju ovim kanalima su obično numerički. Osnovne jedinice (neuroni) obrađuju samo lokalne podatke i ulazne podatke koje dobije preko veza (konekcija). Mreža se podešava na osnovu poređenja izlaznih veličina i ciljanih veličina sve dok izlazi iz mreže ne odgovaraju cilju. Ovakav sistem zahteva mnogo parova podataka da bi se obučila ili trenirala mreža. Povezivanjem ulaza i izlaza i obučavanjem mreže, neuronska mreža izvlači znanje iz raspoloživih podataka i ima sposobnost da uči iz primera.

Neuronska mreža se definiše sa: mrežnom topologijom, funkcijom transfera neurona, i procedurama obučavanja mreže. Topologija neuronskih mreža definiše se specifičnim rasporedom i povezivanjem neurona u obliku mreže. Topologija se obično određuje po broju neurona i po broju neuronskih slojeva (*layer*). Veštački neuroni su predstavljeni promenljivim težinama i težinskim vezama. Suma neuronskih ulaza pomnožena sa odgovarajućim težinskim koeficijentima se propušta kroz aktivacionu funkciju i ta vrednost je izlaz iz neurona. Za vreme obučavanja mreže, algoritam za nadgledano obučavanje poredi podatke dobijene na izlazu sa očekivanim (ciljanim) podacima. Razlika između dobijenih i očekivanih podataka se šalje u proceduru za učenje koja podešava težine u mreži. Jedan od algoritama za obuku je *backpropagation* algoritam u kojem podešavanje težina u mreži ide u smeru u kojem je funkcija performansi opada najbrže.

Neuronske mreže imaju sposobnost da prepoznaju osnovne funkcionalne veze između podataka koje su važne kada takve veze nisu poznate ili ih je veoma teško opisati matematički i/ili kada su prikupljeni podaci „zaprljani“ nekim spoljnim uticajem (*Palit i Popovic, 2005*). Neuronske mreže imaju univerzalnu sposobnost aproksimacije funkcije koja omogućava modeliranje proizvoljnih nelinearnih neprekidnih funkcija do proizvoljnog stepena preciznosti. Neuronske mreže, takođe, imaju sposobnost učenja i

generalizacije iz primera koristeći pristup samopodešavanja na osnovu podataka. Ove karakteristike čine da su neuronske mreže dobar metod za modeliranje dolaznih kašnjenja vozova.

Model neuronske mreže za kašnjenje vozova (NN) koristi ulazne podatke koji su prethodno definisani u radu kao ulazni parametri. Model NN je obučen korišćenjem ulaznih podataka i odgovarajuće ciljne vrednosti za svaki voz. Model neuronskih mreža je *feedforward* mreža sa tan-sigmoid funkcijom transfera u skrivenom sloju i linearnom funkcijom transfera u izlaznom sloju. Izlazni sloj ima jedan neuron – dolazno kašnjenje. Mreža koristi *Levenberg-Marquardt* algoritam za obuku. Model na slučajan način deli ulazne i ciljne (*target*) vektore na tri skupa. Prvi skup čine 60% podataka koji se koriste za obuku mreže. Sledećih 20% podataka se koristi za validaciju da se mreža ponaša odgovarajuće i da spreči obuku pre nego što dođe do prezasićenja (*overfitting*). Poslednjih 20% se koriste kao potpuno nezavisni test mreže. Funkcije transfera za skrivene slojeve su "*tansig*", a težinski koeficijenti za *backpropagation* funkciju učenja su „*learnngdm*". Testirana je različita topologija mreže da bi se pronašla najbolja mreža za model. Početne vrednosti težina je teško utvrditi, pa su upoređene obučene mreže koje su dobijene nezavisnim ponavljanjem učenja pri čemu su na slučajan način menjanje početne vrednosti težina. Prosečna vrednost koeficijenta korelacije R između izlaznih vrednosti (kašnjenja vozova kao rezultat modela) i ciljnih vrednosti (stvarna kašnjenja vozova) i srednja vrednost greške (*MAE*) su proračunati na osnovu rezultata modela. Najbolja mreža je određena na osnovu najveće vrednosti R i najmanje vrednosti MAE. Pri poređenju modela sa različitim funkcijama obuke (kao što su: *Levenberg - Marquardt backpropagation*, *quasi-Newton backpropagation*, *gradient descent backpropagation*, i *resilient backpropagation*) jasno je uočljiva superiornost *Levenberg-Marquardt backpropagation* funkcije obuke iako ona zahteva/zauzima dosta memorije računara. Poređenje funkcija performansi po srednjoj kvadratnoj greški (MSE) i srednjoj kvadratnoj normalizovanoj greški pokazuje da se rezultati ne razlikuju značajno. Na osnovu početnih rezultata, izabrana je mreža sa *Levenberg-Marquardt backpropagation* trening funkcijom i sa funkcijom performansi sa srednjom prosečnom greškom. Takođe, ispitan je uticaj topologije mreže i utvrđeno je da topologija mreže ima uticaj na kvalitet rezultata. Pri odlučivanju predložene topologije mreže treba se rukovoditi time da broj parametara koji se utvrđuje u mreži ne

bude veliki, tako da bi mreža bila efikasna i da broj parametara koji se utvrđuje ne bude veći od broja podataka sa kojim obučavamo mrežu. Mreže koje se sastoje od jednog skrivenog sloja i relativno malog broja neurona u tom sloju (obično se uzima do 20 neurona, mada autori predlažu različite načine utvrđivanja topologije mreže), mogu se efikasno obučiti i lako reprodukovati. U Tabeli 5.4 po topologiji mreže, broju skrivenih slojeva i broju neurona u svakom sloju predstavljeni su rezultati obučavanja mreže za 100 nezavisnih ponavljanja sa variranjem početnih parametara. Najbolji rezultati dobijeni su za mrežu koja ima 16 neurona u 1 skrivenom sloju.

Tabela 5.4 Prosečni rezultati treninga mreža po mrežnim topologijama

Topologija mreže	4 neurona u 1 sloju	8 neurona u 1 sloju	12 neurona u 1 sloju	16 neurona u 1 sloju
Koeficijent korelacije R	0,836	0,861	0,868	0,870
Srednja kvadratna vrednost greške MSE (min)	645	555	529	521
Srednja prosečna vrednost greške MAE (min)	17,1	15,6	15,1	14,9
Suma kvadratnih vrednosti greške SSE (min)	484512	417507	397582	391689

Za najbolju topologiju mreže sa 16 neurona izvršeno je novih 200 simulacija obučavanja da bi se izabrala najbolja struktura težinskih koeficijenata. Izabrana mreža sa najboljim vrednostima ima koeficijent korelacije R od 0,892, sa srednjom vrednošću greške od 13,39 min i sa prosečnim kašnjenjem vozova od 41,9 min i sa standardnim odstupanjem od 42,0 min.

5.10 PROGNOZA KAŠNJENJA VOZOVA VIŠESTRUKOM

LINEARNOM REGRESIJOM

Linearna regresija je pristup gde se koristi modeliranje veze između zavisne i jedne ili više nezavisnih promenljivih. U radu se predlaže model višestruke linearne

regresije za jednu zavisnu promenljivu (kašnjenje voza) i četiri nezavisne promenljive (kategorija/prioritet voza, vreme dolaska, uticaj infrastrukture i pređeni put). Model višestruke regresije definisan je jednačinom:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon, \quad (5.5)$$

gde Y predstavlja zavisnu promenljivu (kašnjenje voza), x_i za $i=1,2,3,4$ predstavlja nezavisne promenljive, β_i za $i=0,1,2,3,4$ su nepoznati parametri u linearnoj funkciji, i ε je greška. Parametri β_i proračunavaju se za model višestruke regresije (Tabela 5.5) po metodi sume najmanjih kvadrata. Koeficijent korelacije za model VLR pokazuju srednje snažnu korelaciju: gde R ima vrednost 0,758.

Tabela 5.5 Koeficijenti višestruke linearne regresije

Nezavisne promenljive	Koeficijent	Y	p vrednost
Konstanta	β_0^i	-427,7	0,000
x_1 – Kategorija voza	β_1^i	52,573	0,000
x_2 – Vreme dolaska	β_2^i	8,678	0,036
x_3 – Uticaj infrastrukture	β_3^i	1,130	0,276
x_4 – Pređeni put	β_4^i	-0,139	0,018

U Tabeli 5.5, p -vrednost za nezavisnu promenljivu x_3 je veća od 0,05, ali iz matrice korelacija (Tabela 5.6) vidi se da je korelacija između kašnjenja i uticaja infrastrukture $R = -0,583$ (za $\alpha = 0,01$). Rezultati ukazuju da bi trebalo razmotriti izostavljanje x_3 iz VLR modela. U slučaju da se izostavi x_3 , modifikovani VLR sa tri ulazne promenljive daje rezultate sa $R=0,761$, što može da ukaže da novi model ne bi dao značajno bolje rezultate. Zbog potrebe poređenja različitih modela kašnjenja vozova u ovom radu korišćen je model sa četiri ulazne promenljive.

Tabela 5.6 Matrica korelacija promenljivih u VLR

		x_1	x_2	x_3	x_4
Y	Pirsonov koeficijent korelacije	0,753	0,106	-0,583	0,550
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,004	0,000	0,000

5.11 REZULTATI MODELA

Rezultati predloženih modela porede se sa odgovarajućim stvarnim kašnjenjima koji se nalaze u uzorku. U ovom poglavlju, izvršeno je poređenje samo onih modela koji koriste prethodne podatke o ponašanju sistema, a to su modeli: neuro-fazi model ANFIS, model neuronske mreže NN i model višestruke linearne regresije VLR. Postoji značajna korelacija između kašnjenja vozova i rezultata dobijenih ANFIS ($R=0,889$), NN ($R=0,892$) i VLR ($R=0,758$) modelima. Najlošije rezultate pokazao je model VLR, gde dobijene teorijske vrednosti kašnjenja odstupaju od empirijskih. U Tabeli 5.7 prikazane su rezultati statističke analize podataka dobijenih predloženim modelima. Posmatrajući prvi kvartil, medijanu i treći kvartil, može se uočiti da je model VLR pokazao najveća odstupanja od stvarnih kašnjenja, dok je najbolje rezultate pokazao model NN. Rezidualna analiza, takođe, pokazuje da se najveće greške tj. odstupanja od predviđenih vrednosti pojavljuju kod modela VLR, a da je najbolje rezultate ostvario model NN.

Tabela 5.7 Rezultati testiranja modela kašnjenja vozova

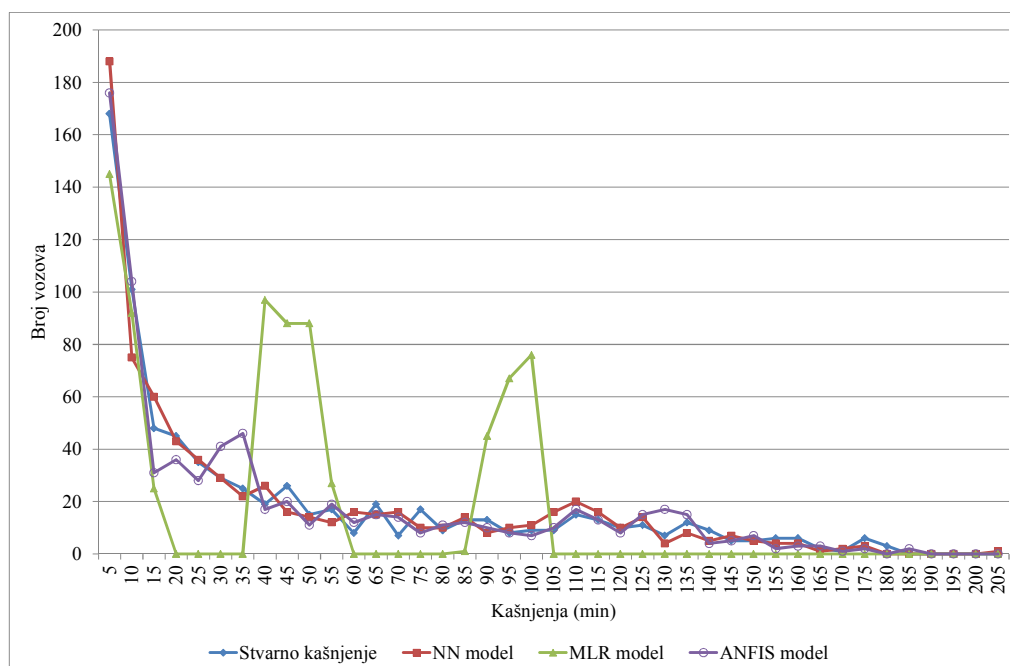
	Prosečno kašnjenje (min)	Standardno odstupanje (min)	Prvi kvartil	Medijana	Treći kvartil
Stvarna kašnjenja	41,8	46,3	5,0	22,0	70,0
NN model	41,9	42,0	7,3	22,5	74,4
VLR model	41,8	35,1	5,7	42,7	89,9
ANFIS model	41,9	43,9	8,4	26,7	75,8

Na Slici 5.13 prikazane su greške prognoze preko grafa rasipanja (*scatterplot*) za tri predložena modela.



Slika 5.13 Greška prognoze modela kašnjenja

Rezultati su statistički ispitivani neparаметarskim testovima Hi-kvadrat i Kolmogorov-Smirnov (K-S test). Oba testa su pokazala da nema razloga odbaciti hipotezu da kašnjenja dobijena NN i ANFIS modelima i stvarna kašnjenja pripadaju istoj populaciji (Slika 5.14).



Slika 5.14 Raspodela frekvencija kašnjenja vozova

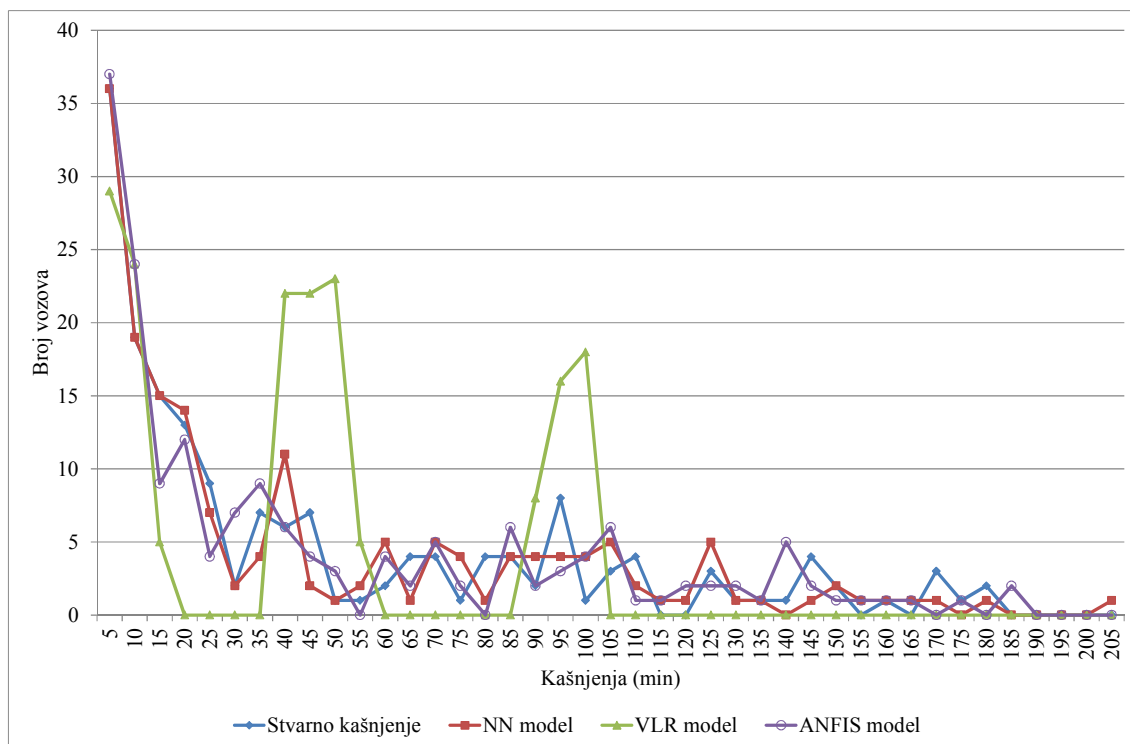
Za VLR model, takođe, nema osnova odbaciti hipotezu da se rezultati slažu sa empirijskim podacima. Na primer, K-S test daje rezultate $D=0,045$ za NN model; $D=0,0492$ za ANFIS model, $D=0,2183$ za VLR model, a za slučaj kada je kritično $D=0,0496$.

Za verifikaciju modela prikupljeni su podaci o dolaznom kašnjenju vozova u stanicu Rakovica u toku prvog dela meseca septembra 2010. godine. Skup podataka za verifikaciju modela sastoji se od 176 vozova. Nakon dobijanja rezultata o kašnjenju vozova na osnovu ulaznih podataka za verifikaciju, rezultati su upoređeni sa stvarnim kašnjenjem iz istog uzorka (Tabela 5.8). Na Slici 5.15, prikazana je frekvencija kašnjenja za verifikaciju poredeći stvarna kašnjenja, rezultate NN modela, rezultate ANFIS modela i rezultate VLR modela.

Tabela 5.8 Rezultati modela kašnjenja za verifikacioni uzorak

	Prosečno kašnjenje (min)	Standardno odstupanje (min)	Prvi kvartil	Medijana	Treći kvartil
Stvarna kašnjenja	43,8	48,4	5,0	20,5	76,0
NN model	43,0	42,5	7,3	22,4	74,5
VLR model	42,0	34,7	5,8	41,2	48,6
ANFIS model	42,6	48,1	8,4	22,9	87,6

Koeficijent korelacije između stvarnih kašnjenja i kašnjenja po NN modelu je 0,818, po ANFIS modelu je 0,765, dok je za VLR model 0,629. K-S test pokazuje da su uzorci i rezultati NN i ANFIS modela iz iste populacije, dok se za VLR model ne prihvata hipoteza (K-S test: $D_{NN}=0,0814 < D_{CRIT}=0,104$; $D_{ANFIS}=0,0756 < D_{CRIT}=0,104$; $D_{VLR}=0,25 > D_{CRIT}=0,104$). Dolazno kašnjenje vozova proračunato NN modelom i ANFIS modelom je veoma slično za oba uzorka (uzorak iz jula i iz septembra 2010. godine) i postoji značajna korelacija sa stvarnim dolaznim kašnjenjima vozova. Rezultati pokazuju da su modeli NN i ANFIS dali odlične rezultate, dok je VLR model dao neprihvatljive rezultate.



Slika 5.15 Poređenje prognoziranih sa stvarnim kašnjenjima za vozove iz verifikacionog uzorka

5.12 REZIME

Modeli neuronskih mreža i adaptivnih neuro-fazi sistema koji su ovde predstavljeni pokazuju da tehnike računarske inteligencije mogu efikasno da se primene i da daju dobre rezultate u prognozi kašnjenja vozova kada postoje veliki poremećaji u sistemu. Prednosti modela su u tome što se kašnjenje voza može proračunati za svaki voz u okviru reda vožnje. Dalja verifikacija modela mora se bazirati na testiranju modela na drugim stanicama na mreže ili na drugim železničkim sistemima. Rezultati i primena modela mogu se koristiti kod simulacionih modela i za analizu železničkih sistema, optimizaciju reda vožnje vozova i kao alat za podršku u odlučivanju kod izrade infrastrukturnih projekata. Za stanicu Rakovica, NN model dao je bolje rezultate od ANFIS modela. Primena modela je moguća za stanice sa poznatim statističkim podacima o kretanju i kašnjenju vozova gde se veza između reda vožnje i infrastrukture može opisati i prilagoditi za formiranje ulaznih parametara NN i ANFIS modela. Kod sistema gde su nedostupni ili nepoznati podaci o prethodnim kašnjenjima, moguća je

primena modela zasnovanog na fazi logici. U tom slučaju potrebno je sprovesti anketu među dispečerima i otpravnicima vozova, zatim ta njihova iskustva i znanje transformisati u parametre funkcija pripadnosti i bazu pravila u fazi sistemu. Predloženi modeli za prognozu kašnjenja vozova mogu se izgraditi i predstaviti Petrijevim mrežama visokog nivoa. To znači da struktura i parametri modela računarske inteligencije mogu da se predstave mestima, prelazima i granama Petrijeve mreže. Prema tome, zadatak Petrijeve mreže kod modeliranja kašnjenja vozova bio bi da reprodukuje parametre i strukture predloženih modela. Dobijeni model Petrijevih mreža omogućio bi da se kašnjenje vozova uključi direktno u simulaciju saobraćaja vozova.

6 SIMULACIONI MODEL PETRIJEVIH MREŽA SAOBRAĆAJA VOZOVA

6.1 UVOD

Simulacija interakcije železničkih vozila sa infrastrukturom u skladu sa definisanim pravilima kretanja vozova i po određenom redu vožnje je efikasan pristup analizi složenih železničkih sistema. Simulacioni model mora da sadrži sve neophodne podatke o pravilima i propisima kretanja vozova, o infrastrukturi, o redu vožnje vozova i o spoljašnjim uticajima koji deluju na posmatrani sistem. U ovom poglavlju opisan je model Petrijevih mreža visokog nivoa koji se koristi za izradu simulacionih modela saobraćajnih procesa u železničkim sistemima. Vozovi su predstavljeni tokenima, odseci su mesta, a prelazi predstavljaju diskretne događaje kretanja vozova. Hijerarhija modela definisana je preko podistema (modula) u grafu Petrijevih mreža koji predstavljaju izolovani odsek. Izlazni podaci dobijeni simulacionim modelom Petrijevih mreža koriste se za kreiranje izveštaja o stanju odseka, praćenju kretanja svakog voza, izradi grafikona saobraćaja vozova, kao i za animaciju izvršenja simulacije.

Da bi simulacija verno predstavljala sistem, neophodno je da se u modelu definišu svi uslovi koji važe i u realnom sistemu. U model Petrijevih mreža ugrađene su sve zakonitosti i pravila koja se koriste za regulisanje saobraćaja vozova. Neka od tih pravila su:

- pri formiranom putu vožnje u stanici drugi put vožnje može se formirati samo ako se sa prvim ne poklapa, ne ukršta i ne dodiruje;
- u putu vožnje sve skretnice (kao i zaštitne skretnice) moraju biti dovedene u pravilan i ispravan položaj za dati put vožnje i u njemu osigurane na pouzdan način tako da se ne mogu prekratati za vreme dok se ne obavi predviđena vožnja;

- svi signali koji se nalaze na putevima vožnji koje mogu da ugroze postavljeni put vožnje bilo čeno, bočno ili u sustizanju moraju pokazivati signalni znak zabranjene vožnje.

Odseci u modelu definisani su na osnovu plana prostornih odseka na prugama i u stanicama. Granice prostornih odseka su izolovani šinski sastavi. Svaki pojedinačni odsek se prati i kontroliše se njegova zauzetost, broj vozova koji pređe preko odseka, ukupno vreme zauzetosti odseka kao i prosečnu zauzetost odseka jednim vozom. Ovim je omogućeno praćenje kretanja vozova kao i u stvarnom sistemu saobraćaja vozova.

6.2 PRIPREMA OBJEKATA PETRIJEVE MREŽE ZA IZRADU MODELA SAOBRAĆAJA VOZOVA

Petrijeve mreže visokog nivoa su matematički alat koji može da predstavi različite diskretne sisteme kao što su složeni sistemi saobraćaja vozova (*Burkolter, 2005, Kaakai et al., 2007, Kluge, 2003, Ricci i Tieri, 2008, Vanit-Anunchai, 2010*). Za primenu Petrijevih mreža u simulacionom modeliranju složenih sistema neophodno je primeniti softver koji ima mogućnost da kreira graf Petrijeve mreže visokog nivoa, da omogući povezivanje modela sa eksternim bazama za ulazne i izlazne podatke i da omogući animaciju simulacijeradi lakše verifikacije i validacije modela. Za tu svrhudostupno je više kvalitetnih programa (Prilog IV). Model sistema saobraćaja vozova urađen je pomoću softvera *ExSpect v6.41* (*Aalst, 1999, Van Hee et al., 1993*).

Kod Petrijevih mreža visokog nivoa tokeni imaju svojstva *tipova (types)* i *podataka (values)*. Takođe, svako mesto u mreži je obeleženo tipom tako da samo tokeni koji imaju isti tip mogu pristupiti tom mestu. U *ExSpectu* su pored mesta, prelaza i grana, definisani i dodatni objekti koji služe da pojednostave izradu modela. Specijalna vrsta mesta je *skladište (store)*, koje uvek sadrži jedan token, a koristi se da predstavlja promenljivu. Definisan je i *procesor (processor)*, koji predstavlja specifičan prelaz čije se ponašanje određuje naredbama ugrađenog programskog jezika. Zadatak procesora je da testira i modifikuje vrednosti tokena. U samom tokenu pored ostalih podataka koji se nalaze u boji, nalazi se i podatak o vremenu, tj. o trenutku u vremenu kada token postaje dostupan za aktiviranje prelaza. Osobina hijerarhije Petrijevih mreža

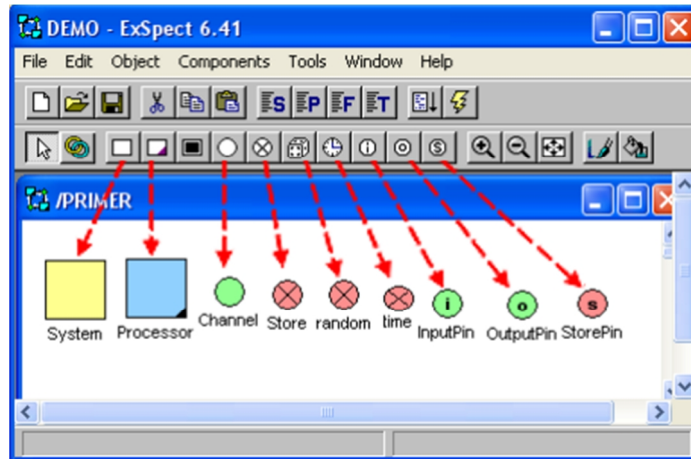
visokog nivoa u *ExSpectu* je omogućena preko objekata koje se nazivaju *sistemi* (*systems*). Sistemi sadrže kombinacije mesta prelaza, procesora, skladišta i grana koje su povezane u jednu celinu kao deo podsistema nižeg nivoa, a povezani su sa okruženjem preko specifičnih objekata tipa *pin*.

Petrijeve mreže su prvenstveno orijentisane na uslovljavanje prelaza sistema iz jednog stanja u drugo. Prelazi se ostvaruju nakon ispunjenja nekog uslova ili događaja, gde događaj može biti i trenutak kada protekne vreme definisano u nekom od stanja. Pored diskretnog protoka vremena, u modelu je potrebno definisati uslove i ograničenja koje postoje u sistemu. Da bi se izradio simulacioni model Petrijevih mreža složenog sistema saobraćaja vozova, model treba dovoljno uprostiti, ali tako da sve zakonitosti i veze budu očuvane i verno predstavljaju sistem (*Basten et al., 1995*).

Model je razvijen u softverskom okruženju koje ima mogućnosti da kreira Petrijeve mreže sa sledećim osobinama:

- **mreže visokog nivoa** (*High-level Petri Nets*); Petrijeve mreže nove generacije koje imaju složene tipove markiranja i logičke izraze i funkcije koje se koriste za manipulaciju obojenim tokenima u mestima i prelazima;
- **hijerarhijske**; sa mogućnošću kreiranja hijerarhijskih mreža gde se kretanje tokena prati u više nivoa, čak i sa mogućnošću da Petrijeva mreža bude token Petrijeve mreže. Ova osobina omogućava kreiranje veoma složenih modela kombinovanjem iz skupa modula (podsistema);
- **vremenske**; ovo osobina je jako važna jer omogućava kretanje i praćenje vozova koji se kreću kroz sistem. Vremenska komponenta uslova prelaza zavisi od vremena potrebnog da voz pređe preko odseka. Ovo vreme može se odrediti na različite načine. U ovom modelu koristi se deterministički određeno vreme koje se dobija iz jednačina za dinamičko kretanje voza. Vreme se može predstaviti i stohastički pomoću raspodelaverovatnoća;
- **stohastičke**; ova mogućnost dozvoljava da se u model ubace stohastičke vrednosti vremena koje bi predstavljale kašnjenja vozova ili zauzetosti elemenata infrastrukture, a koja se modeliraju po nekoj od prethodno utvrđenih raspodelaverovatnoća;
- **obojene Petrijeve mreže**; Tokeni u modelu obeleženi su bojom koja predstavlja skup podataka koji prate token kroz model. Tokom dinamičkog kretanja tokena,

obojeni tokeni mogu da menjaju sadržaj informacija koje nose, što omogućava manipulisanje tokenom i definisanje uslova prelaza. Na taj način određuje se putanja tokena kroz model, što omogućava praćenje i analizu kretanja svakog voza u modelu.



Slika 6.1 Osnovni prozor ExSpecta

U programu postoje definisani gotovi programski blokovi kojima se jednostavno definišu određeni objekti u modelu (Slika 6.1). Na ekranu su objekti prikazani grafičkim simbolom koji omogućava lako prepoznavanje tipa objekta (mesto, prelaz itd.), a „duplim klikom“ ulazi se prozor za definisanje i pregled karakteristika objekta i u prozor u kojem se jednostavnim programskim jezikom definišu uslovi i kriterijumi tog objekta. Kao što se vidi na Slici 6.1 ti objekti su (Aalst, 1999):

1. **sistem** (*System*); definiše podsistem u kom će se nalaziti model. Može se definisati i sistem u sistemu tj. podsistem. U tom slučaju tokeni ulaze i izlaze iz podsistema preko ulaznih i izlaznih veza (Input i Output pin), a u samom podsistemu moguće je kreirati posebnu mrežu koju će tokeni napustiti i vratiti se u model višeg nivoa kad ispune sve zadate uslove i obave sve prelaze u podsistemu.
2. **procesor** (*Processor*), **prelaz**; u njemu se definišu uslovi prelaza iz mesta u mesto. Takođe može se definisati skup pravila koja se moraju ispuniti da bi token u napustio svoje mesto ili prešao u sledeće, što znači da token ne samo mora da ispuni pravila prelaza koja su definisana u procesoru nego mora da ispuni i uslove da bi procesor uopšte razmatrao taj token. Ovde se pokazuje osobina obojenih Petrijevih mreža gde je moguće da procesor na osnovu boje tokena odluči da li će ga prihvatiti ili uputiti na drugi, čime se postiže efekat upravljanja kretanjem voza kroz model.

3. **kanal, mesto** (*Channel*); ovaj objekat u modelu predstavlja izolovani odsek (prostorni, skretnički, kolosečni ...). Dolazak tokena (voza) u mesto (odsek) i napuštanje mesta definiše se u prelazima koji su povezani sa ovim mestom. Zadržavanje voza u kanalu (odseku) može se pratiti, jer svi tokeni/vozovi imaju kao jedan od parametara vremensko obeležje (*timestamp*) koje se menja diskretno u trenucima dolaska i odlaska na odsek/mesto. Ovi podaci o vremenu ulaska i izlaska sa odseka/mesta dinamički se šalju (u toku izvršenja simulacije) u definisani spoljni program. Kao jedan od parametara objekta definisan je link ka spoljnom fajlu koji može da skladišti sve podatke. Zbog pogodnosti kasnije obrade podataka i dobro poznatog i univerzalno primenjivog formata izabran je Excel fajl. Statističkom obradom podataka moguće je za svaki odsek u modelu dobiti detaljne podatke o vremenu zauzetosti odseka svakim vozom ili ukupnu i prosečnu zauzetost. Takođe je moguće pratiti i ukupnu zauzetost i fizičku zauzetost odseka.
4. **skladište** (*Store*); skladište služi da čuva podatke koji se koriste u toku izvršenja simulacije. U modelu se koristi nekoliko vrsta skladišta.
 - a) skladište ulaznih podataka o vozovima u modelu. Program daje mogućnost da se vrednosti parametara koje su čuvaju u skladištu učitaju iz spoljne baze podataka formirane u Excel fajlu. Na taj način mogu se menjati ulazni podaci modela i vršiti eksperimenti na modelu, a da se sam model ne menja. Takva skladišta definisana su u podsistemu/modulu za generisanje vozova gde se iz Excelove baze podataka učitavaju vrednosti koje definišu red vožnje vozova. U bazu podataka uneta su vremena između polazaka vozova za dati smer uz podatke o broju voza, relaciji, vremenu polaska i dodatne podatke.
 - b) skladišta koja čuvaju podatke o izolovanim odsecima u modelu. Podaci o odseku su: ime odseka, dužina odseka, tip odseka, maksimalna dozvoljena brzina preko odseka i ostali podaci. Ovi podaci definišu se direktno u modelu i to za svaki odsek pojedinačno.
 - c) skladišta stanja odseka. Zbog kontrole zauzetosti odseka i regulisanja kretanja vozova, odnosno, formiranja pravila po kojima se kreću vozovi kroz model, potrebno je znati stanje svakog od odseka u modelu. Stanje odseka se beleži u skladištu koje je povezano sa odsekom i to dinamički u toku izvršenja simulacije kada voz uđe ili napusti odsek. Definisano je kao celobrojno i te

celobrojne vrednosti koriste se i za animaciju kretanja vozova, odnosno zauzetosti odseka u toku izvršenja simulacije. Vrednosti koje može da ima skladište su 0-slobodan odsek; 1-odsek slobodan, ali je sledeći odsek u putu vožnje zauzet; 2-odsek zauzet.

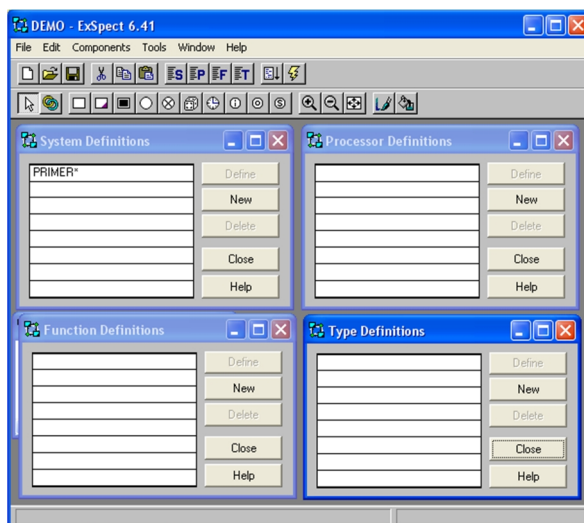
- d) skladišta signala i privole; takođe su definisana kao celobrojna i povezana su sa procesorima odseka na kojima se nalaze. Stanja signala menjaju se nailaskom voza isto kao i realnim sistemima tako da su pravila upravljanja SS uređajima u potpunosti preslikana.
5. **generator slučajnih brojeva** (*Random*); koristi se kod generisanja kašnjenja vozova u modelu za raspodelu definisanu u prelazu.
6. **generator vremena** (*Time*); skladište koje je povezano sa svim procesorima jer se u ovom skladištu prati globalni časovnik po kojem se odvijaju događaji/aktivacije i prelazi iz mesta u mesto.
7. **ulaz u podsistem** (*InputPin*); koristi se u podsistemima ili modulima. Ovoj je ulazna veza u podsistem, odnosno veza podsistema sa sistemom višeg nivoa.
8. **izlaz iz podsistema** (*OutputPin*); slično kao i prethodni samo je ovo izlazna veza iz modula.
9. **veza skladišta sa podsistemom** (*StorePin*); ovo skladište postoji u modulu kao veza sa nekim postojećim skladištem u sistemu višeg nivoa, npr. veza sa skladištem vremena.

Postoje dva načina modeliranja sistema u *ExSpect*-u. Prvi način je kreirati model ubacujući mesta i prelaze za svaki element modela, a zatim ih povezati granama prelaza i definisati uslove prelaza. Ovaj način zahteva da se svaki element ili objekat sistema posebno definiše i poveže. Kod malih i prostih sistema ovaj način je efikasan, precizan i pouzdan jer programer može lako da sagleda sve veze i ubaci sve podatke u model. Ovde se ne koriste mogućnosti programa da se naprave sistemi koji mogu više puta da se koriste i koje se čuvaju u programu (*System from Library*).

Drugi način podrazumeva kreiranje podsistema, odnosno modula. Ovi moduli se čuvaju u bazi programa i mogu se pozvati i vrlo jednostavno ubaciti u model. Ova osobina je veoma korisna kod kreiranja velikih modela gde se neki elementi modela više puta pojavljuju. U modelu saobraćajnih procesa, moduli su napravljeni za

izolovane odseke. Odseke možemo podeliti na prostorne, skretničke i kolosečne, ali je potrebna i detaljnija podela na osnovu saobraćajnih karakteristika odnosno pozicije odseka u odnosu na signale, stanice i rasputnice. Modul je definisan za svaki karakterističan odsek koji se pojavljuje u planu izolovanih odseka sistema. Model se kreira tako što se definisani moduli odseka (*System from Library*) ubacuju po redosledu kao u sistemu, a zatim se međusobno povezuju i povezuju se sa skladištima u modelu. Ovakav proces modeliranja sistema oduzima više vremena prilikom početnog definisanja modula i relacija u modelu, ali omogućava da se ovako formirani moduli koriste za modeliranje bilo kojeg sistema gde postoje slični procesi kao što su stanice, otvorene pruge, industrijski koloseci, terminali, depoi i slično.

ExSpect ima definisanu bazu gde se čuvaju sve definicije za određeni model. Pozivanje, editovanje i kreiranje novih definicija lako se izvodi preko 4 prozora koja se otvaraju sa glavnog menija. Prozori prikazuju listu svih definicija određenog tipa koje postoje u modelu. Postoje 4 tipa definicija (Slika 6.2): definicije sistema, definicije procesora (prelaza), definicije funkcija i definicije tipova.



Slika 6.2 Definicije u ExSpectu

Definicije sistema – (System Definitions)

Prozor u kome se definišu osnovni sistemi modela, kao i svi podsistemi/moduli.

Definicije procesora (prelaza) – (Processor Definitions)

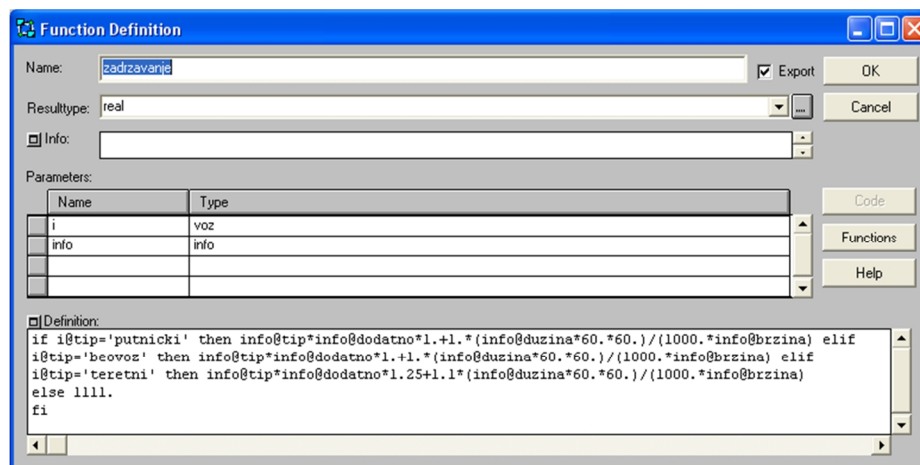
Svi procesori koji se pojavljuju u sistemu i modulima prikazani su na listi. Parametri procesora kao i uslovi prelaza definisani u njima mogu se izmeniti direktno iz

ovog prozora, tako da nije neophodno da se pretražuje grafička predstavka modela da bi se pronašao procesor. Procesori predstavljaju *prelaze* i sadrže definisane uslove za prelazak iz *mesta* u *mesto*. Svaki modul koji predstavlja određeni tip odsek sadrži najmanje dva procesora. Jedan procesor je na ulazu u modul i služi da proveri zauzetost odseka, da odredi vreme vožnje voza po odseku i da u zavisnosti od tipa odseka odredi dalje kretanje voza. Drugi procesor proverava stanje narednog odseka i tek kada se on oslobodi, vozu se dozvoljava da napusti odsek. Stanje zauzetosti odseka proverava se dva puta (na ulasku u postojeći i pre napuštanja prethodnog) tako da ne postoji mogućnost da se na jednom odseku nađe više od jednog voza. U procesorima se proveravaju i menjaju podaci koje token nosi sa sobom. Takođe, procesori šalju podatke skladištima vezanim za taj odsek o stanju zauzetosti odseka. Podaci koji se nalaze u skladištima vezanim za odsek menjaju se u modulu odseka i služe za:

- praćenje stanja odseka u toku simulacije preko brojeanih indikatora skladišta (*store*),
- animaciju stanja zauzetosti odseka vožnjama vozova,
- prikupljanje statističkih podataka o stanju odseka, gde se podaci izvoze u Excelovu bazu podataka.

Definicije funkcija – (Function Definitions)

Pored već definisanih standardnih matematičkih funkcija koje postoje u bazi programa, moguće je ubaciti i specifične funkcije i izraze koje se koriste u modelu. Ova opcija se koristi kada se ista funkcija pojavljuje više puta u modelu. U modelu je definisana i funkcija koja je nazvana *zadržavanje* koja služi za proračun vremena zadržavanja voza na odseku (Slika 6.3). U ovoj definiciji pojavljuje se formula koja opisuje zakonitost između veličina (dužina odseka, brzina preko odseka) koje se kasnije očitavaju iz skladišta povezanog sa odsekom. Funkcija se poziva u svakom od procesora koji povezuju odseke i na osnovu rezultata dobijenog proračunom funkcije određuje se zadržavanje voza na odseku. Funkcija izračunava vreme kretanja voza po odseku u zavisnosti od tipa voza, dužine odseka i dozvoljene brzine na odseku, a u nekim slučajevima i od tipa odseka i dodatnog vremena kod odseka gde treba uzeti u obzir dodatna vremena za polazak ili zaustavljanje.



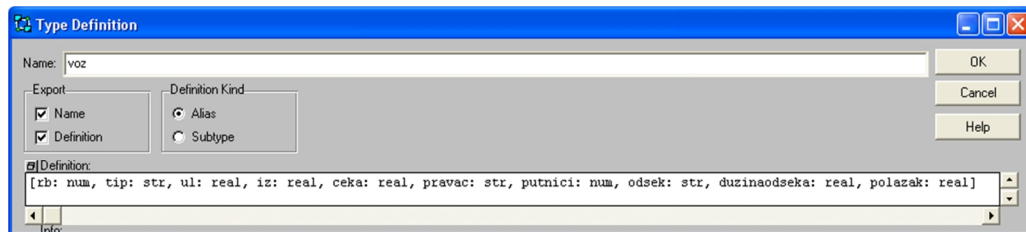
Slika 6.3 Definicije funkcija ExSpecta

Definicije tipova – (Type Definitions)

Ovde se definišu tipovi objekata koji se kreiraju i koji se skladište. Program već ima definisane standardne tipove koji mogu da se koriste (*num, str, real, itd.*), ali moguće je definisati i posebne specifične tipove koji će se koristiti u modelu. Ovi tipovi mogu biti složena kombinacija postojećih standardnih ili novih tipova. U modelu su definisana dva nova tipa. Prvi tip **voz**, koristi se za opis tokena/vozova i omogućava učitavanje ulaznih podataka i praćenje kretanja za svaki voz pojedinačno (Slika 6.4). Tip tokena se definiše i prati kroz ceo model. Definisani su kao složeni tip koji se sastoji od podataka različitih formata: num, str i real. U ovom tipu definisani su sledeći podaci o vozu:

- **rb** - redni broj voza, odnosno broj voza. Definiše se u spoljnoj bazi podataka koja je povezana sa programom i učitava se prilikom pokretanja simulacije.
- **tip** - definiše tip voza. Ovo se koristi prilikom proračuna vremena vožnje voza po odseku. Takođe, definiše se u spoljnoj bazi podataka i učitava po pokretanju simulacije.
- **ul** – vreme na časovniku u trenutku kad je voz ušao na odsek. Menja se u toku izvršenja simulacije na svakom odseku koji voz prođe.
- **iz** – slično kao i prethodno, samo se ovde radi o vremenu časovnika u trenutku napuštanja odseka.

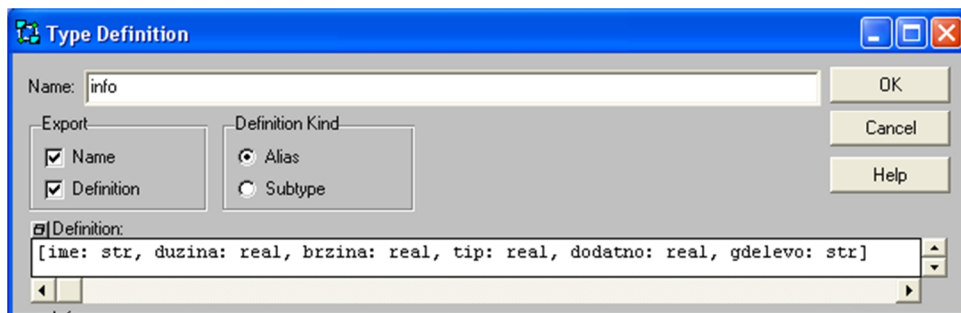
- **ceka** – podatak koji se proračunava u svakom procesoru koji predstavlja odsek. To je razlika vremena **ul** i **iz** i proračunatog vremena vožnje za taj odsek, tj. to je vreme koje voz provede na odseku u čekanju (vreme na odseku, a nije vreme vožnje).
- **pravac** – unapred definisan podatak u bazi podataka koji određuje kretanje voza kroz model.
- **odsek** – podatak koji se dinamički menja kretanjem kroz model. Pokazuje ime poslednjeg odseka na kojem je boravio voz.
- **duzinaodseka** – slično kao i prethodni, ali prati podatak o dužini odseka.
- **polazak** – podatak iz spoljne baze podataka u kojem se definiše trenutak polaska voza iz stanice, odnosno trenutak pojavljivanja u modelu.



Slika 6.4 Definicija tipa u ExSpectu – tip *voz*

Svi ovi podaci u tipu *voz* prate se u toku izvršenja simulacije i u trenutku ulaska voza u naredni odsek podatak tipa *voz* se izvozi u definisanu bazu podataka u Excelu. Na taj način može se pratiti kretanje svakog voza kroz model (vreme vožnje i čekanja na odseku).

Drugi tip *info*, koristi se kod označavanja odseka, odnosno za popunjavanje skladišta povezanog sa svakim od odseka(Slika 6.5).



Slika 6.5 Definicija tipa u ExSpectu – tip *info*

Ovi podaci se unose pojedinačno u svako skladište u kojem se nalaze podaci za odsek.

Sastav tipa *odsek* definisan je sa sledećim podacima:

- **ime** – oznaka odseka u modelu. Koristi se zbog lakšeg praćenja i pregleda podataka u animaciji simulacije kao i u prikupljanju podataka o kretanju vozova kroz model;
- **dužina** – dužina odseka koja se koristi za proračun vremena vožnje voza po odseku.;
- **brzina** – određuje maksimalnu dozvoljenu brzinu na tom odseku i koristi se za proračun vremena vožnje;
- **tip** – definiše tip odseka. Ovaj podatak je uveden kao opcioni i za sada se ne koristi aktivno u modelu;
- **dodatno** - definiše dodatno vreme vožnje za polazak i zaustavljanje. Definisan je kao opcioni i ne koristi se proračunu vremena vožnje;
- **gdelevo** – podatak koji se koristi u logičkom pitanju na skretničkom odseku na kom se određuje dalji pravac kretanja voza.

6.3 MODULI U SIMULACIONOM MODELU SAOBRAĆAJA

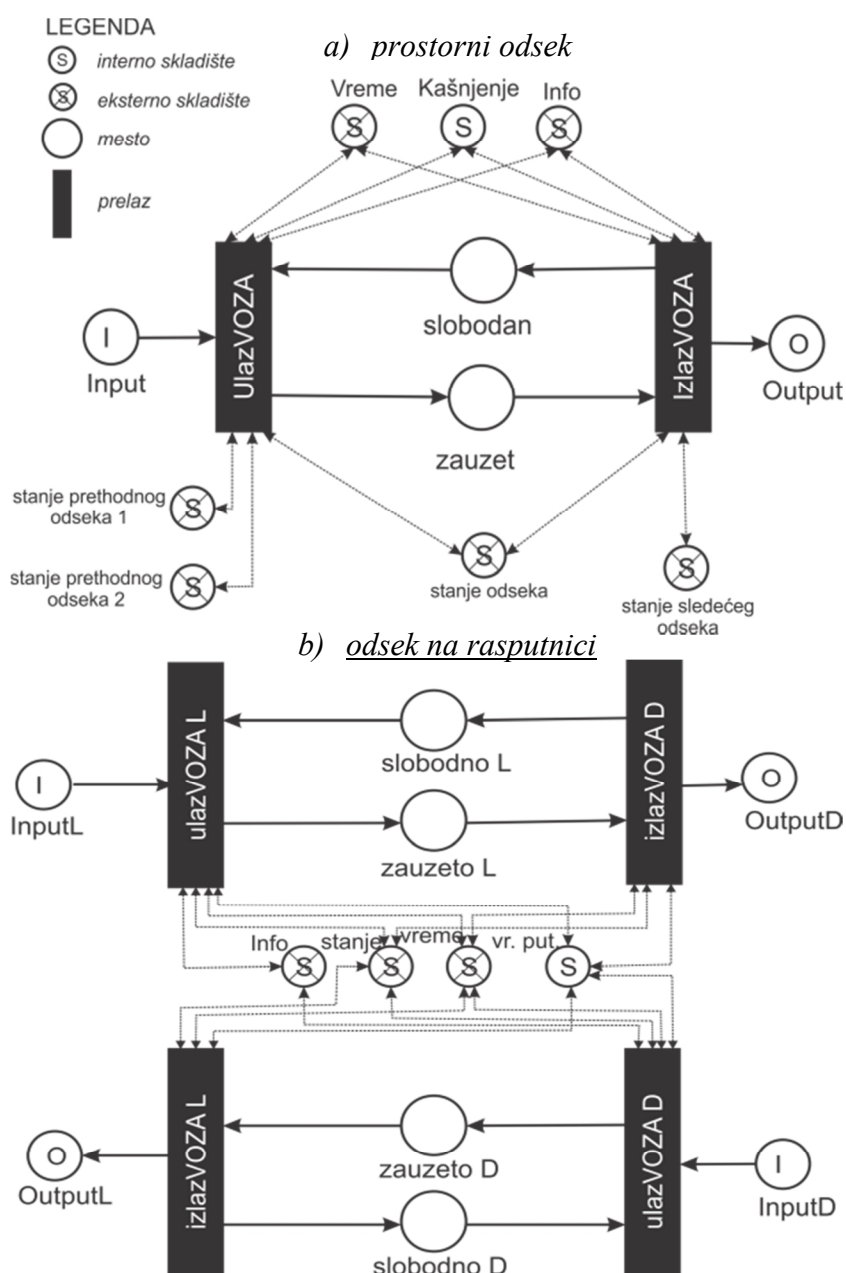
VOZOVA

Koristeći osobinu Petrijevih mreža da predstavi hijerarhiju, formirani model saobraćaja vozova u ovom radu zasnovan je na modulima odseka koji su međusobno povezani. Svaki specifični odsek, koji se definiše položajem u sistemu ili njegovom funkcijom u regulisanju kretanja vozova, definisan je podsistemom Petrijeve mreže. Takav podsistem ili modul povezuje se sa susednim ili funkcionalno zavisnim modulima istog ili različitog tipa.

Na Slici 6.6 prikazana je graf Petrijeve mreže za dva karakteristična odseka u sistemu: prostorni odsek i odsek na rasputnici. Moduli su definisani granama koje povezuju mesta, prelaze i skladišta. Token (voz) se može naći u jednom od dva mesta: jedno koje sadrži token kada je odsek zauzet (*zauzet*) i drugo koje sadrži token kada je

odsek slobodan (*slobodan*). Uslovima koji su definisani u prelazu *UlazVOZA* određuje se kada voz može da uđe na odsek.

Na taj način stanje odseka može biti jedino slobodno ili zauzeto tj. na jednom odseku ne može se naći više od jednog voza. Na sličan način, prelaz *IzlazVOZA* određuje kada će token napustiti modul. Za ispunjenje logičkih uslova koji su definisani u prelazima koriste se informacije koje se nalaze u skladištima: *vreme*, *info*, *kasnjenje*, *stanje odseka*, *stanje sledećeg odseka* itd.

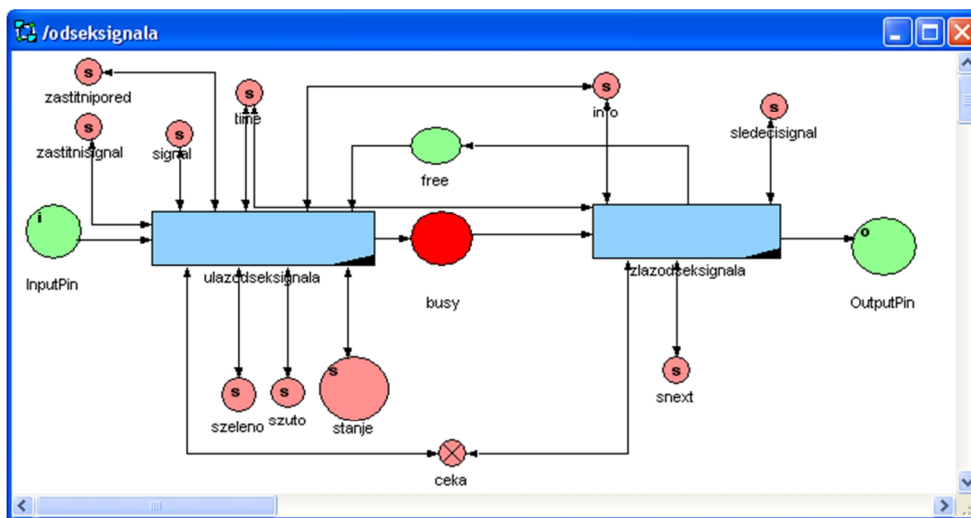


Slika 6.6 Šema Petrijeve mreže za dva karakteristična modula

Povezivanje modula vrši se po planu izolovanih odseka sistema i u skladu sa logikom i pravilima saobraćaja vozova. U nastavku su predstavljeni neki specifični moduli koji su definisani za karakteristične podsisteme i odseke u sistemu saobraćaja vozova.

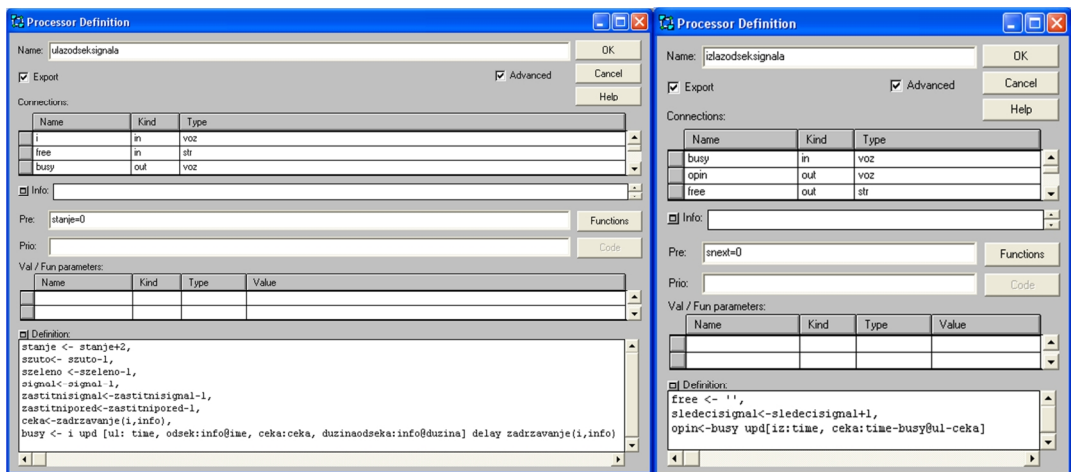
1) modul prostornog odseka

Modul predstavlja prostorni odsek na otvorenom delu pruge. Kao što se vidi na Slici 6.7 procesori koji su zaduženi za ulaz (*ulazodseksignala*) i izlaz (*izlazodseksignala*) vozova u odseku povezani su velikim brojem skladišta (*store*) koji su zaduženi za čuvanje podataka koji su potrebni procesorima. Jedan tip skladišta služi za čuvanje podataka koji se koriste u procesoru za postavljanje logičkih uslova i proračun vremena vožnje. To su skladišta: *time*, *info* i *ceka*. Drugi tip skladišta služi da prikuplja podatke dobijene izvršavanjem ograničenja i uslova u procesorima modula. Ova skladišta zatim daju informacije o stanju signala i stanju odseka. Ova stanja signala i odseka koriste se za postavljanje uslova o kretanju voza kroz odsek i prikupljaju se tokom izvršenja simulacije u Excelovu bazu podataka.



Slika 6.7 Modul prostornog odseka

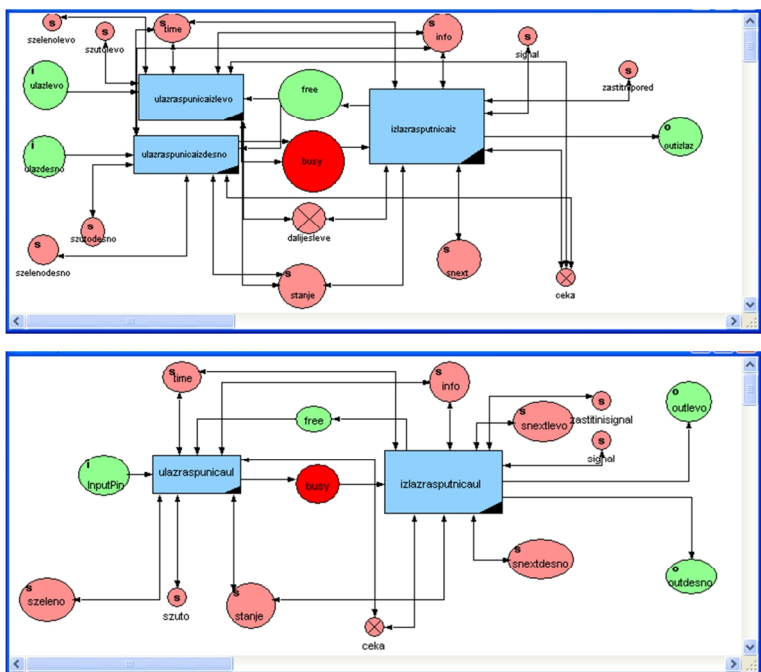
Na Slici 6.8 dati su izgledi procesora ulaza i izlaza iz modula (*ulazodseksignala* i *izlazodseksignalaI*) sa svim definicijama. Ova dva procesora prikazana su kao primer definicije procesora.



Slika 6.8 Definicije ulazodseksignala i izlazodseksignala

2) modul rasputnice-ulivni tok

Modul skretničkog odseka koji predstavlja rasputnicu na otvorenoj pruzi i to posmatrajući ulivni smer kretanja, prikazan je na Slici 6.9.



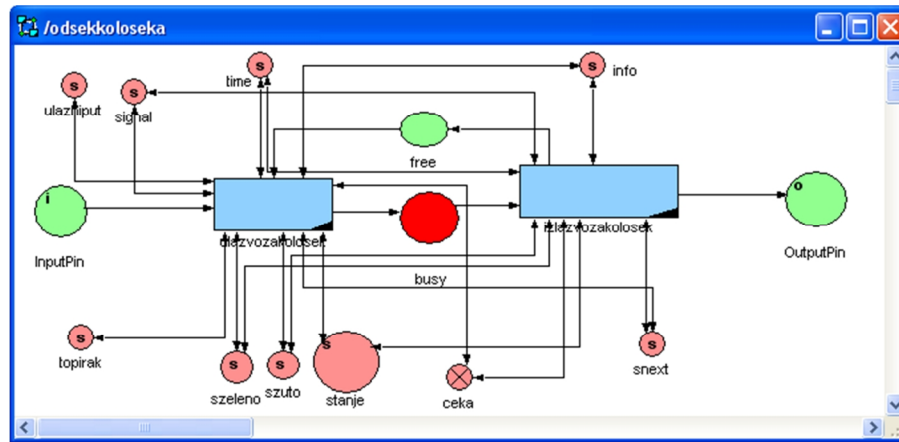
Slika 6.9 Moduli rasputnice-ulivni tok i izlivni tok

3) modul rasputnice-izlivni tok

Modul skretničkog odseka predstavlja rasputnicu na otvorenoj pruzi i to posmatrajući izlivni smer kretanja (Slika 6.9).

4) modul koloseka

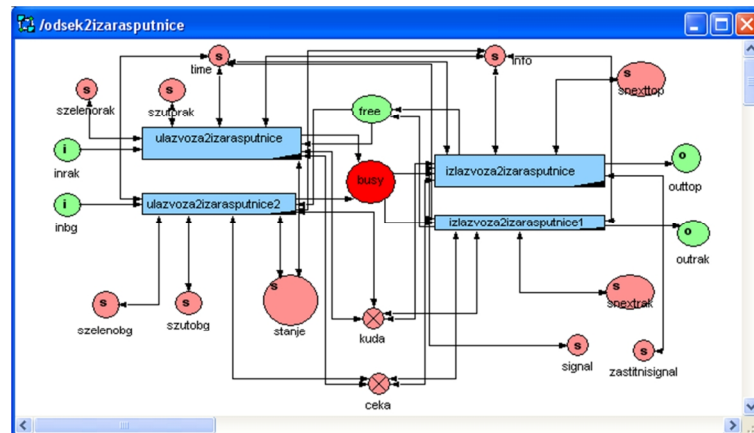
Modul predstavlja odsek koloseka u stanici (Slika 6.10).



Slika 6.10 Modul koloseka

5) modul kosog ukrštaja

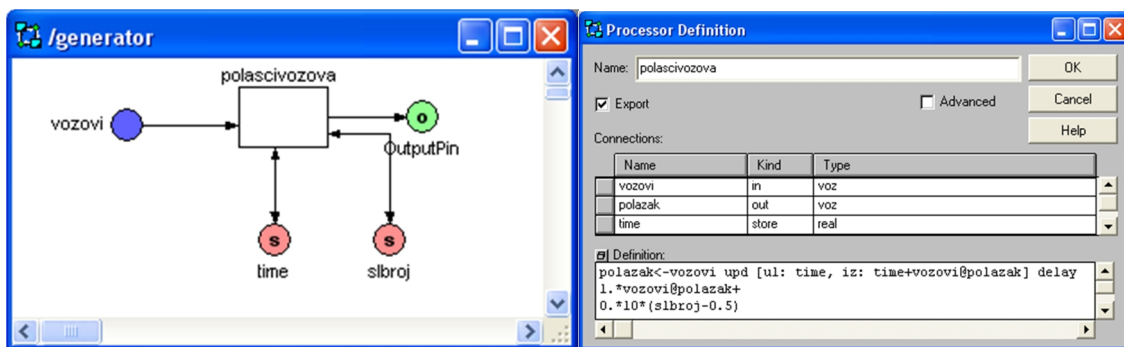
Modul predstavlja izolovani odsek na kome se nalazi kosi ukrštaj koji pripada sistemu rasputnice (Slika 6.11).



Slika 6.11 Modul kosog ukrštaja

6) modul generisanja vozova

Ovaj modul predstavlja mesto ulaska vozova u model. Procesor *polascivozova* (Slika 6.12) dodeljuje tokenima koji se nalaze u mestu *vozovi* podatke koji su definisani u tipu *voz*. U ovom modulu učitavaju se podaci iz baze podataka o svakom vozu i generišu se vozovi koji će se kretati kroz model.



Slika 6.12 Modul generisanja vozovai definicija procesora

Pored ovih modula postoje moduli koji su slični već navedenim, a razlika postoji u pravilima koja se moraju ispuniti u zavisnosti od položaja odseka u sistemu (npr. prostorni odsek ispred rasputnice). Moduli se mogu definisati za izolovane odseke u različitim delovima sistema ili za različita pravila saobraćaja vozova. Na primer, za potrebe simulacije železničke stanice i putnog prelaza u okviru stanice mogu se definisati odseci putnog prelaza, staničnog skretničkog odseka ili koloseka sa specifičnim namenama. U modulima je moguće definisati različita pravila sleđenja vozova, sisteme signalizacije, rešavati konflikte vozova (Prilog V), itd.

Kada se definišu svi tipovi modula koji će se koristiti u modeliranju sistema, kreiranje simulacionog modela složenog sistema svodi se na raspoređivanje modula u nizove u skladu sa redosledom odseka u sistemu, a zatim i povezivanje modula. Moduli se međusobno povezuju preko *mesta*. Nakon toga u model se pored standardno definisanih skladišta za tekući časovnik (*time store*) i po potrebi za generator slučajnih brojeva (*random store*), ubacuju i četiri tipa skladišta (*store*):

- I. skladišta tipa *info*, koja služe za čuvanje podataka o odseku (tip, dužina...),
- II. skladišta koja predstavljaju zauzetost odseka. Ova skladišta se definišu numerički sa 0, 1 i 2, gde oznaka 0 znači da su taj i sledeći odsek u smeru kretanja voza slobodni, oznaka 1 da je odsek slobodan, ali da se na sledećem odsek nalazi voz i oznaka 2 koja znači da se na odseku nalazi voz.
- III. skladišta koja predstavljaju stanje međustaničnog odseka kod kretanja vozova u međustaničnom razmaku. Definišu se sa numeričkom vrednošću 0 i 1, gde 0 predstavlja slobodan odsek, a 1 zauzet.
- IV. skladišta koja predstavljaju stanje signala, odnosno koji signalni znak pokazuje signal. Pokazivač signala definisan je sa dva moguća stanja: 0 – slobodno

(dozvoljena dalja vožnja voza iza signala) i 1 – zabranjeno (nije dozvoljeno dalje kretanje voza iza signala).

Vrednost parametra u skladištima koji su prethodno navedeni u tačkama II, III i IV, menja se u procesorima odseka prilikom ulaska voza na odnosni odsek i susedne odseke.

Nakon definisanja i obeležavanja svih skladišta u modelu potrebno je povezati ih sa modulima preko *StorePin* skladišta definisanih u modulima. Time je izrada simulacionog modela završena. Pre nego što se počne sa simulacijom neophodno je definisati i ulazne podatke sistema. Ulazni podaci su podaci o vozovima koji će se pojaviti u modelu. Mogu se tabelarno organizovati u Excel tabeli i zatim preko uvoznog interfejsa ubaciti u model pre izvršenja simulacije. Generisanje vozova u modelu može se definisati sa brojem vozova koje će se propustiti kroz model i to po tipu voza, relaciji voza i vremenu između polazaka vozova. Vreme između polazaka vozova istog tipa i relacije može se generisati stohastički i deterministički tj, po nekoj od standardnih raspodela (ili zakonitosti) ili po određenom redu vožnje vozova. Ova vremena mogu se na bilo koji način definisati u *Excelovoj* tabeli i zatim ubaciti u model, a moguće je i definisanje intervala između polazaka vozova u samom modelu po nekoj od raspodela koje postoje u biblioteci definicija u *ExSpectu*.

Nakon pripreme ulaznih podataka, ostaje još da se definišu podaci i uređaji u modelu koji će izvoziti podatke o toku simulacije u *Excel* fajl i da se na osnovu pokazivača stanja skladišta uradi animacija izvršenja toka simulacije.

Za potrebe ovog modela pripremljena je baza podataka u *Excelu* koja služi da prikupi podatke koje šalje program u toku izvršenja simulacije. U bazi se, zatim, ti podaci klasifikuju i obrađuju za grafički prikaz rezultata simulacije. Iz baze je moguće dobiti podatke o svakom vozu i njegovom kretanju kroz model i podatke o odsecima u modelu – ukupnu i fizičku zauzetost za svaki odsek. Baza je prilagođena za brzo kreiranje izveštaja po upitima: o vozu, odseku, signalima i čekanju vozova u modelu. Ovi podaci mogu se predstaviti tabelarno ili grafički. Baza omogućuje još jednu mogućnost koja je veoma značajna za validaciju i verifikaciju simulacionog modela. U bazi je razvijen sistem za transformaciju podataka dobijenih simulacijom u niz naredbi koje izvršavaju crtanje toka simulacije u *AutoCad*-u. Ova grafička predstavka toka

simulacije osmišljena je kao crtanje grafikona vožnje vozova gde se vozovi kroz model prate po odsecima modela. Podloga nacrtana u *AutoCadu* služi kao osnova na kojoj se unose trase vozova po odsecima modela.

Animacija izvršenja toka simulacije urađena je tako da predstavlja stanje odseka modela. U toku izvršenja simulacije svaki odsek menja svoje parametre (koji se nalaze u skladištu) nailaskom voza na odsek. Ovi numerički podaci se koriste za animaciju odseka tako što se numerička vrednost parametra koristi za davanje vizuelnog identiteta stanja zauzetosti odseka.

6.4 PRIMENA FAZI PETRIJEVIH MREŽA U MODELU

KAŠNJENJA VOZOVA

Fazi Petrijeve mreže FPN (*fuzzy Petri Nets*) mogu se napraviti na više načina. Petrijeve mreže se sastoje od četiri tipa objekata: prelaza, mesta, tokena i grana. Svi ovi objekti mogu biti fazifikovani (fazi tokeni, fazi mesta, fazi prelazi i fazi grane) (*Virtanen, 1995*). Fazi token je generalizacija tokena koja mu dodaje vrednosti tačnosti tvrdnje da pripada nekom mestu. Token ima lingvističku vrednost koja je definisana kao funkcija pripadnosti za lingvističku promenljivu. Ova funkcija određuje i stepen pripadnosti u određenom mestu ili vrednost istine te tvrdnje. Modeliranje fazi sistema sa klasičnim Petrijevim mrežama ili sa Petrijevim mrežama visokog nivoa, pretpostavlja da su elementi tako redefinisani da se mogu koristiti fazi informacije i da su strukturni i funkcionalni elementi tako definisani da se mogu predstaviti specifičnosti fazi sistema (*Looney, 1988, Palit i Popovic, 2005*). Najčešće korišćene tehnike fazi rezonovanja su Mamdani i Sugeno metode (*Nakanishi et al., 1993*).

Fazi rezonovanje tipa Mamdani, polazi od pretpostavke da je izlaz procesa zaključivanja fazi skup. Skup *IF-THEN* pravila, koji formira lingvistički opis u sistemu fazi logike je:

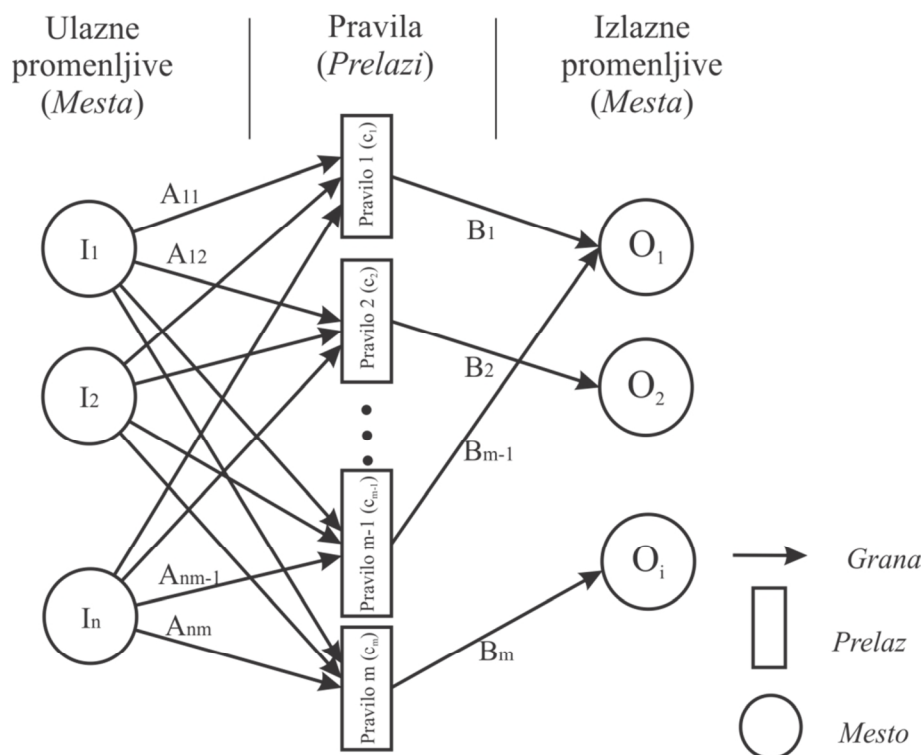
Pravilo 1 (c₁): IF I_1 je A_{11} AND ... AND I_n je A_{1n} THEN O je B_1 ,

Pravilo i (c_i): IF I_1 je A_{i1} AND ... AND I_n je A_{in} THEN O je B_i ,

Pravilo m (c_m): IF I_1 je A_{m1} AND ... AND I_n je A_{mn} THEN O je B_m ,

gde je: I_i ulazna promenljiva, O je izlazna promenljiva, A_{ij} i B_i određene pretpostavke koje predstavljaju ulazne i izlaznu promenljivu, $Pravilo i$ je pravilo sa lingvističkim opisom, i c_i predstavlja stepen pripadnosti za primenu $Pravila i$.

Ova pravila mogu se grafički predstaviti koristeći fazi Petrijevu mrežu sa *mestima*, *prelazima* i *granama* (Slika 6.13), gde svaki prelaz predstavlja jedno pravilo iz baze pravila.



Slika 6.13 Šema Petrijeve mreže modela fazi pravila

Modeli fazi sistema mogu se lako definisati u nekom od postojećih softverskih paketa. Proces fazi rezonovanja sastoji se od pet koraka:

- fazifikacija ulaznih promenljivih;
- primena fazi operatora (*AND* ili *OR*) na prethodni član;
- implikacija sa prethodnog (*antecedant*) na posledični (*consequent*) član;
- agregacija sa posledičnog člana koristeći pravila;
- defazifikacija.

Modul fazifikacije omogućava prelaz svake ulazne promenljive i pretvara *numerički* ulazni signal u odgovarajuću fazi. Ulaz je fazifikovan proračunom funkcije. Ulazna vrednost x_0 se zatim proračunava koristeći ulazne promenljive definisane fazi skupovima A i proračunava se $\mu_A(x)$. Svaki ulaz se fazifikuje za sve kvalifikovane funkcije pripadnosti koje zahtevaju fazi pravila. Faza obrade u fazi sistemima zasniva se na skupu logičkih pravila koja se data u formi *IF-THEN* izraza, gde se deo *IF* naziva prethodni član (*antecedens, antecedant*), a *THEN* deo se naziva posledični član (*konsekvent, consequent*). Nakon što su ulazi fazifikovani, prethodni član se analizira. Ako prethodni član za izabrano pravilo ima više od jednog dela, primenjuje se fazi operator da bi se dobio jedan broj koji predstavlja rezultat prethodnog člana za to pravilo. Broj se zatim primenjuje na izlaznu funkciju. Fazi operator *AND* bira najmanju od ulaznih vrednosti. Težina povezana sa svakim pravilom se aplicira na broj dobijen od prethodnog člana. Zatim, metod implikacije se koristi da bi se dobio fazi skup predstavljen funkcijom pripadnosti. Sledećem članu (*consequent*) menja se oblik koristeći funkciju asociranu sa prethodnim članom, zatim se metod implikacije primenjuje za svako pravilo kao *MIN* (*minimum*).

S druge strane, funkcija agregacije objedinjava rezultate svih fazi pravila u jedan fazi skup sa agregacionom metodom *MAX* (*maximum*). U konačnom koraku defazifikacije, dobijeni fazi izlazni skup se pretvara u numeričku (*crisp*) vrednost. Fazi sistem rezonovanja tipa Mamdani može se lako modelirati pomoću Petrijevih mreža. Grafovi Petrijevih mreža mogu se kreirati u skladu sa specifičnim karakteristikama fazi sistema kao što su broj ulaza, broj izlaza, broj fazi pravila i tipovi fazi operatora. Dobijeni model fazi Petrijevih mreža može se modifikovati koristeći vrednosti novih fazi skupova i ostalih karakteristika sistema fazi rezonovanja. Mamdani tip fazi sistema se često koristi jer je ta metoda intuitivna i prilagođena ljudskom razmišljanju.

Sugeno metoda, druga često korišćena tehnika fazi rezonovanja koristi singleton kao funkciju pripadnosti posledičnog člana pravila. Sličnost između Mamdani i Sugeno metoda je u pristupu fazifikacije ulaza i primene operatora. Osnovna razlika je u tipu izlazne funkcije pripadnosti koja kod Sugeno metode može biti samo linearna funkcija ili konstanta.

Sugeno metoda je kompaktnija i računarski efikasnija od Mamdani sistema pa je moguće izraditi modele fazi sistema koristeći adaptivne tehnike. Ove adaptivne tehnike

moгу se koristiti za određivanje funkcije pripadnosti tako da fazi sistem najbolje opisuje podatke (*Palit i Popovic, 2005, Sivanandam et al., 2007*). U poređenju sa Mamdani metodom, Sugeno metoda bolje radi sa optimizacijom i adaptivnim tehnikama, daje kontinuitet u izlaznoj površi i veoma je pogodna za matematičku analizu.

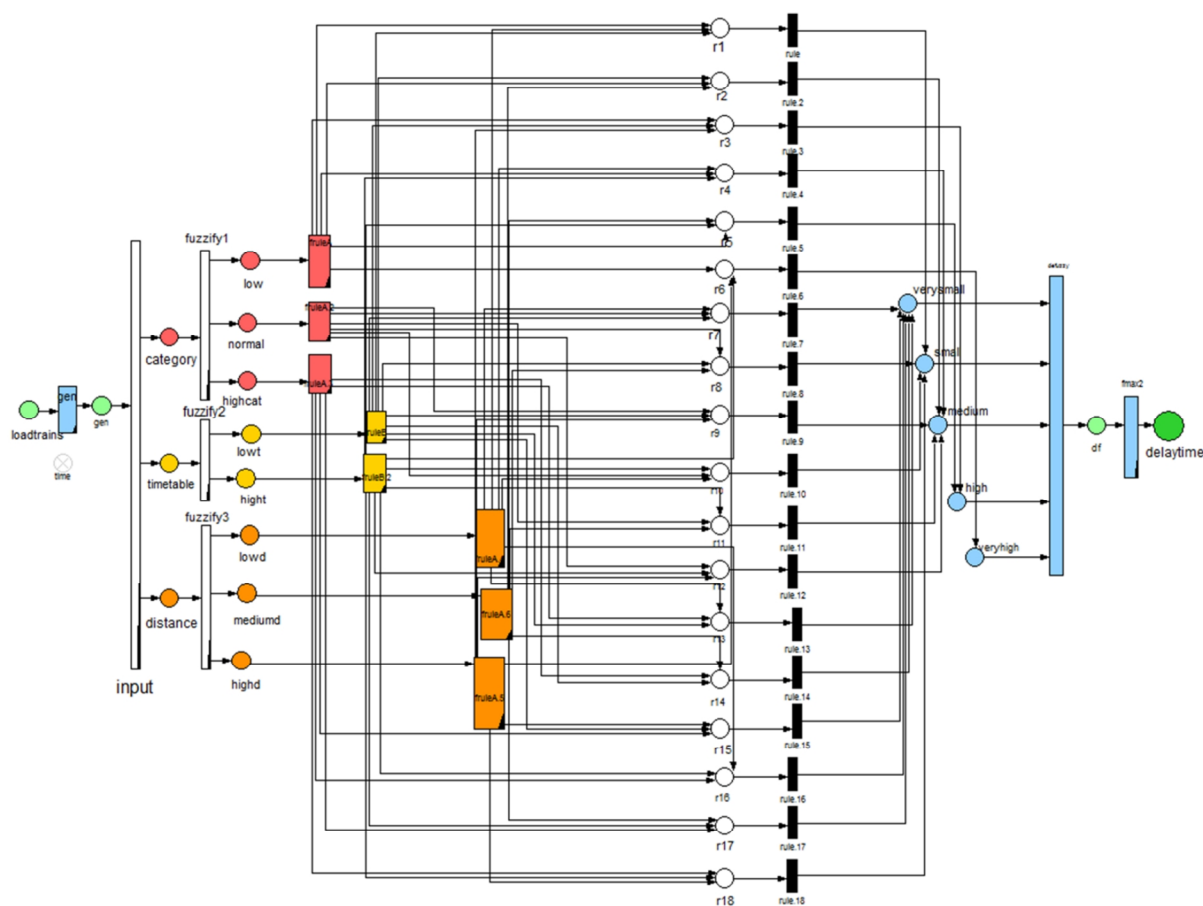
Sugeno metoda se koristi kod adaptivnih neurofazi sistema - *Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS)*. Adaptivne mreže su mreže koje se sastoje od čvorova i direktnih veza. ANFIS hibridni model kombinuje neuronske mreže i fazi logiku (*Jang, 1993*). Koristi sposobnost neuronskih mreža da uče iz podataka i mogućnosti sistema fazi logike da tumače neprecizne podatke. Koristeći date skupove ulazno-izlaznih podataka, ANFIS sistemi formiraju sistem fazi rezonovanja gde se parametri podešavaju koristeći *backpropagation* algoritam. Ovakav pristup omogućava sistemu da uči iz podataka koje modelira. Za vreme procesa obuke ANFIS-a određuju se *IF-THEN* pravila i funkcije pripadnosti fazi skupova. Dok traje obuka ANFIS modela, stvaraju se i podešavaju veze između ulaza i izlaza. Kada se završi obuka, ANFIS model se može koristiti za proračun izlaznih vrednosti za date vrednosti ulaza.

Modul fazi Petrijevih mreža za proračun primarnih kašnjenja vozova

U slučaju primene simulacionog modela za analizu kašnjenja i efekata primarnih kašnjenja na ostale vozove, modul fazi Petrijevih mreža je prvi podsistem u koji token ulazi u modelu. U ovom modulu se primenom neke od predloženih tehnika računarske inteligencije proračunava primarno kašnjenje svakog voza. Kada se kašnjenje proračuna u modulu fazi Petrijeve mreže, voz ulazi na prvi odsek (stanični odsek) u modelu onda kada se vreme na časovniku simulacije poklopi sa vremenom dolaska voza po redu vožnje uz dodatno vreme kašnjenja. Strukture, veze, pravila i težine modula fazi Petrijeve mreže definisani su na osnovu znanja i iskustva eksperata ili statističkih podataka o kašnjenju vozova za svaku stanicu na ulazu modela. Modul može da se koristi za predstavljanje, Mamdani modela fazi rezonovanja, ili ANFIS sistema za kašnjenje vozova (*Milinković et al., 2013*).

Na Slici 6.14 prikazan je modul za proračun primarnih kašnjenja za stanicu Rakovica, a koji je opisan kroz primer proračuna kašnjenja preko fazi logike u poglavlju 5.5. Modul se sastoji od povezanih mesta i prelaza koji pomoću formalizama Petrijevih mreža predstavljaju fazi logički sistem. Ulaz ima tri promenljive koje su predstavljene

sa tri, dva i tri fazi skupa, respektivno. Fazi logičko zaključivanje se zasniva na ukupno 18 pravila koja su predstavljena prelazima. Na desnoj strani modula, nalazi se izlazna promenljiva koja je predstavljena sa 5 fazi skupova i procesorima u kojima se određuje način defazifikacije. Token koji uđe u ovaj modul predstavlja voz koji je generisan po redu vožnje. Token je obojen, tj. on nosi sve informacije o vozu, osim podatka o primarnom kašnjenju tog voza. Pre izlaska iz modula, proračunato primarno kašnjenje se dodaje obojenom tokenu u definiciju njegovog tipa kao podatak *kasni*.



Slika 6.14 Modul fazi Petrijeve mreže za proračun primarnog kašnjenja

Tokom daljeg kretanja kroz model, a nakon izlaska iz ovog modula, podaci o polasku po redu vožnje i o primarnom kašnjenju voza koriste se za određivanje kada je najranije moguće aktivirati prelaz tokena u modul koji predstavlja prvi odsek na putu vožnje voza.

6.5 REZIME

Diskretni događaji u sistemima saobraćaja vozova definisani su složenim uslovima prelaza koji sadrže pravila saobraćaja vozova i vremena definisana dinamikom kretanja vozova. Graf Petrijevih mreža kojim bi se predstavili uslovi samo jednog prelaza bi bio veoma složen, što bi značilo da bi simulacioni model rasputnice bilo veoma teško konstruisati. Novi dijalekti Petrijevih mreža, koji su objedinjeni u Petrijeve mreže visokog nivoa, omogućavaju da se pri modeliranju diskretnih događaja koriste obojeni tokeni, logički izrazi i funkcije u definisanju uslova prelaza kao i hijerarhija modela. Primena Petrijevih mreža visokog nivoa omogućila je modularni pristup i znatno jednostavniju izradu modela saobraćaja vozova. Na taj način, u model su ugrađene sve zakonitosti i pravila koja se koriste za regulisanje saobraćaja vozova.

Vozovi su predstavljeni obojenim tokenima, a prelazi predstavljaju diskretne događaje kretanja vozova. Hijerarhija modela definisana je preko podsistema (modula) u grafu Petrijevih mreža koji predstavljaju izolovani odsek. Za svaki karakteristični odsek napravljen je modul. Model se izrađuje na osnovu ulaznih podataka koji određuju raspored i povezanost odseka u modelu i podataka koji se koriste za red vožnje vozova. Za vreme simulacije prati se kretanje tokena kroz model, ali i zauzetost odseka preko stanja mesta. Rezultati simulacije čuvaju se u eksternoj bazi izlaznih podataka. Izlazni podaci omogućavaju analizu zauzetosti odseka, broja vozova koji pređu preko odseka, ukupnog vremena zauzetosti odseka kao i prosečne zauzetosti odseka jednim vozom. Rezultati simulacije mogu se predstaviti tabelarno, grafički ili pomoću animacije.

7 PRIMENA PETRIJEVIH MREŽA ZA MODELIRANJE ODABRANE RASPUTNICE

7.1 UVOD

Modularni pristup simulaciji saobraćaja vozova omogućava modeliranje i analizu različitih železničkih sistema sa različitim principima i pravilima saobraćaja vozova. Pri modeliranju saobraćaja vozova diskretni prelazi su događaji koji prate stanje izolovanih odseka u sistemu. Ti događaji su zauzeća odseka vozom, oslobađanja odseka ili rezervisanja odseka zbog zauzetosti u putu vožnje voza. Aktiviranje događaja ili ispunjavanje uslova za prelaz stanja sistema zavisi od karakteristika i uslova definisanih u sistemu. Pri izradi modula, u njih se ugrađuju uslovi prelaza sistema iz jednog stanja u drugo, uskladu sa uslovima ponašanja sistema. Model može da se izmeni promenom redosleda modula ili izmenom modula. Na taj način, omogućena je jednostavna izrada modela, ali i izmena postojećeg modela zbog potreba eksperimentisanja sa različitim rešenjima (varijantama) sistema.

7.2 MOGUĆNOSTI PRIMENE PETRIJEVIH MREŽA ZA SIMULACIJU SAOBRAĆAJA VOZOVA

Predloženi model saobraćaja vozova koristi Petrijeve mreže visokog nivoa kao alat za izradu simulacionog modela. S obzirom na modularni pristup u izradi modela, postoje velike mogućnosti primene ovog modela. U toku istraživanja i razvoja modela, model je testiran i analiziran prilikom modeliranja više različitih sistema saobraćaja vozova. Kod modeliranja sistema rasputnica model je korišćen za:

- analizu uticaja pravila saobraćaja (sleđenja) vozova na zauzetost i iskorišćenost elemenata rasputnice (*Milinković, 2007*),
- analizu različitih infrastrukturnih rešenja rasputnica (*Milinković et al., 2012a*),
- ispitivanje uticaja rasputnice na sekundarna kašnjenja vozova (*Milinković et al., 2013, Milinković et al., 2010*).

Dodavanje novih i prilagođavanje postojećih modula pruža mogućnost primene predloženog modela na modeliranje saobraćaja vozova u stanicama i na putnim prelazima. Pri tome, moguće je model prilagoditi za simulaciju različitih sistema signalizacije, pravila saobraćaja vozova, tehnološke procese u stanicama itd.

Jedan od primera primene je izrada simulacionog modela putnog prelaza u stanici Batajnica. Model Petrijeve mreže korišćen je za analizu denivelacije putnog prelaza u stanici Batajnica. Posmatrana su dva modela stanice Batajnica: model postojećeg rešenja stanice Batajnica i model stanice sa izvedenom denivelacijom. Specifičnost izrade modela stanice je u definisanju tabele zavisnosti izolovanih odseka u stanici i pravila na osnovu kojih se vozovima dodeljuju putevi vožnje i definišu prioriteti u zauzimanju koloseka vozovima. Za definisanje pravila koja upravljaju kretanjem vozova u modelu stanice Batajnica, najpre je potrebno proučiti tehnologiju rada sistema, kao i vrste vozova koji saobraćaju kroz stanicu. Za ispitivanje zauzetosti koloseka u sistemu, kao i za zauzimanje određenog puta vožnje u zavisnosti od pravca kretanja voza, definisan je sistem procesora koji simulira rad dispečerske službe. Takođe, zbog specifičnosti sistema stanica, definisani su procesori koji (5s po dolasku voza na kolosek) oslobađaju odseke ulaznog dela puta vožnje, kao i procesori koji po izlasku voza iz sistema oslobađaju izlazni deo puta vožnje.

Dobra mogućnost adaptacije modela za simulaciju stanica potvrđena je kroz model Petrijevih mreža za analizu rada stanice *Mjölby* u Švedskoj. Cilj izrade ovog modela bila je analiza i utvrđivanje mesta mogućih konflikata u stanici, a posmatran je i uticaj na stvaranje poremećaja u redu vožnje u slučaju otkaza pojedinih skretnica ili koloseka u stanici. Na švedskim železnicama primenjuju se različita pravila saobraćaja vozova, drugačiji su sistemi i signalizacije i tehnološki procesi u stanici su specifični. Zbog toga, bilo je potrebno izmeniti pojedine module, a najkompleksniji korak bio je definisanje dispečerske logike. U modelu stanice *Mjölby* dispečerska logika nije ograničena samo na jedan ili dva procesora, već je inkorporirana u skoro svaki signal (procesor signala). Time je omogućeno sa jedne strane uprošćavanje koda, a sa druge strane mnogo veća fleksibilnost u radu modela. U stanici *Mjölby* postoji veliki broj različitih mogućih vožnji, a često se koriste i samo ulazne vožnje za putničke vozove, pa je zbog toga bilo neophodno raščlaniti dispečersku logiku na što više procesora. Ovo je učinjeno tako što su svi ulazni i većina graničnih kolosečnih signala predstavljeni posebnim procesorom.

Pri izradi ovih modela za neke odseke su se mogli koristiti postojeći moduli, ali za neke je bilo neophodno razvijati nove. Na primer, kod kreiranja modela stanice *Mjölby* bilo je neophodno ubaciti specifičnosti vezane promenu smeru voza na određenim graničnim kolosečnim odsecima, ili procesore perona koji služe da simuliraju zadržavanje određenih putničkih vozova na peronskim kolosecima. Pri izradi modela složenih sistema, koristi se veliki broj modula i procesora, što čini da graf postane veoma kompleksan. Za verifikaciju i validaciju modela, korišćena je animacija rada stanice, gde se promena zauzetosti koloseka i ostalih izolovanih odseka koristi za praćenje hoda vozova i formiranje puteva vožnji kroz stanicu.

7.3 IZRADA SIMULACIONOG MODELA ODABRANE

RASPUTNICE

Za analizu i testiranje modela Petrijevih mreža odabrana je rasputnica "G" koja se nalazi u beogradskom železničkom čvoru i može se svrstati u složene dvokolosečne rasputnice sa kosim ukrštajem. Da bi ovaj sistem mogao da se modelira sa svim zakonitostima koje podrazumevaju složeni saobraćajni procesi, granice modela

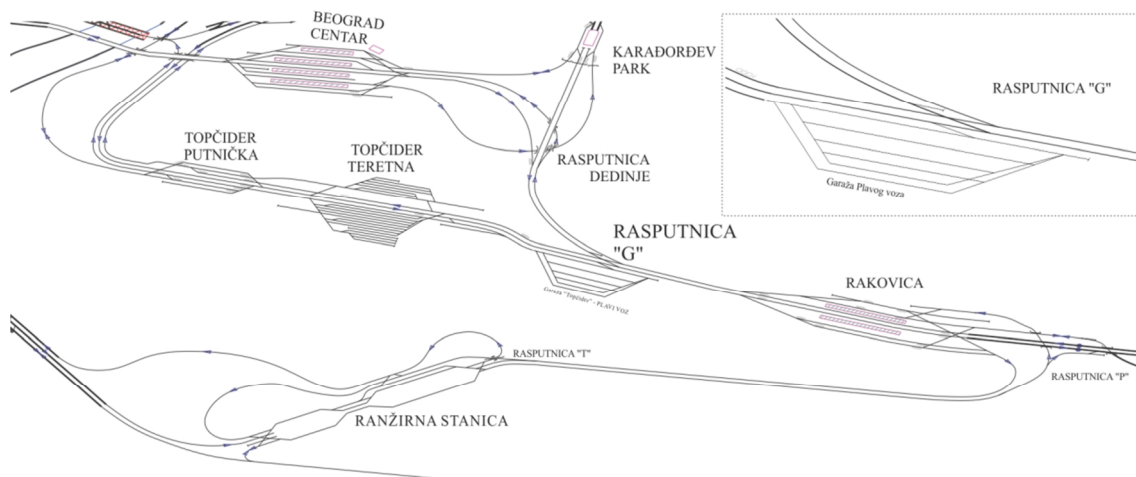
postavljene su na kolosecima stanica oko rasputnice „G“ (Slika 7.1 - pozadina preuzeta sa *GoogleEarth*). U okviru granica modela nalazi se još jedna rasputnica sličnih karakteristika – rasputnica „Dedinje“. Deo beogradskog železničkog čvora koji se posmatra nalazi se između stanica Beograd Centar, Topčider, Rakovica i stajališta Karađorđev Park (Prilog VI). Između ovih stanica nalazi se rasputnica "G" u km 7+186 dvokolosečne pruge Beograd-Niš, odnosno u km 4+416 pruge Beograd centar-Niš. Na ovoj rasputnici se spajaju dve dvokolosečne pruge: pruga iz Beograda (preko stanice Topčider) i pruga iz Beograd Centra. Signalno-sigurnosnim uređajima na rasputnici “G” rukuje se sa komandnog stola stanične postavnice u stanici Rakovica. Putevi vožnje prema i od rasputnice “G” do stanice Rakovica mogu se formirati na sve i sa svih koloseka stanice Rakovica, pa se u tom smislu deonica od rasputnice “G” do stanice Rakovica smatra staničnim područjem stanice Rakovica.



Slika 7.1 Šema dela čvora sa rasputnicom „G“

Na području rasputnice "G" ugrađeno je šest skretnica (Slika 7.2) koje su obeležene oznakama od 1g do 6g. Skretnica 1g je ugrađena na desnom koloseku pruge Beograd centar-Niš. Ovom skretnicom se odvaja slepi kolosek, koji služi kao zaštitni kolosek. Skretnica 2g je ukrasno dvopostavna i preko nje se ostvaruje put vožnje sa četvrtog i petog glavnog prolaznog koloseka stanice Rakovica za pravac Topčider i Beograd centar i obratno. Skretnica 3g je ugrađena na desnom koloseku pruge Beograd-Niš i njome se odvaja slepi kolosek koji služi kao zaštitni kolosek pri saobraćaju iz stanice Topčider za Rakovicu. Skretnica 4g je ugrađena na desnom koloseku pruge

Beograd-Niš i njome se odvaja slepi kolosek koji služi kao zaštitni kolosek pri saobraćaju iz stanice Rakovica u pravcu Topčidera i obratno. Skretnica 5g je ugrađena na garažnom koloseku i obezbeđuje put vožnje sa slepog koloseka i obratno. Skretnica 6g je ugrađena na levom koloseku pruge Beograd-Niš i obezbeđuje vožnju iz stanice Rakovica u pravcu Topčidera i Beograd Centra i obratno. Skretnice su pouzdano pritvrđene i postavljaju se sa centralnog mesta iz stanične postavnice. Rasputnica "G" nije posednuta staničnim osobljem.



Slika 7.2 Kolosečna šema sistema rasputnice "G"

Na međustaničnim rastojanjima između stanica Rakovica, Beograd centar, Karadorđev park i Topčider, saobraćaj vozova odvija se u režimu sleđenja vozova na zelenu svetlost pri automatskom pružnom bloku (APB). Zaštitni signali ispred rasputnice "G" sa strane Beograd Centra i Topčidera nalaze se na km 4+180, a sa strane Rakovice u km 4+742. Rastojanje od ovih signala do rasputnice je 225 metara iz pravca Beograd Centar, a iz pravca Rakovice 237 m. Zaštitni signali ispred rasputnice (Zu96, Zu90 i ZoG1) postavljeni su tako da od njih pa do rasputnice nije dovoljna dužina puta vožnje da bi se zaustavio voz. U slučaju da voz prođe pored signala koji pokazuje signalni znak da nije dozvoljena vožnja, u lokomotivi će se aktivirati auto-stop uređaj. Rastojanje od zaštitnih signala do rasputnice manje je od zaustavnog puta voza koji se kreće brzinom od 80 km/h. To znači da bi voz koji prođe kroz crveno svetlo ugrozio vozove koji se nalaze u putu vožnje preko rasputnice. Time je ugrožena bezbednost saobraćaja. Ovaj problem može da se reši na dva načina. Prvi način je da se na ovom delu čvora saobraćaj vozova organizuje u međustaničnom razmaku. Drugi način je da se

zaštitni signali ispred rasputnice "G" premeste na takvo rastojanje od rasputnice da postoji dovoljna dužina za zaustavljanje voza. U ovom slučaju bilo bi moguće organizovati saobraćaj vozova u režimu APB-a sa sleđenjem na zelenu svetlost, a da su svi bezbednosni uslovi ispunjeni. Varijanta saobraćaja vozova u kojoj je predloženo izmeštanje zaštitnih signala rasputnice omogućava bezbedan saobraćaj vozova u režimu sleđenja na zelenu svetlost pri APB-u. Na osnovu ovih pretpostavki i ulaznih podataka urađen je simulacioni model.

7.3.1 KARAKTERISTIKE I OPIS ULAZNIH PODATAKA ZA SIMULACIONI MODEL

Vozovi su u modelu podeljeni na tri kategorije. Zbog sličnih karakteristika međunarodni daljinski putnički i unutrašnji daljinski putnički su svrstani u jednu kategoriju, u drugoj su prigradski i gradski vozovi, a u trećoj su teretni vozovi. Postoje i lokomotivski, radni i drugi vozovi, ali oni nisu uzeti u obzir zbog toga što oni nemaju stalan red vožnje i pojavljuju se samo u slučaju potrebe. Zbog toga ih je teško analizirati i predvideti koliki je njihov uticaj na model. Ovi vozovi se ne pojavljuju često i saobraćaju onda kada nema drugog saobraćaja i kada ne ometaju redovan saobraćaj, pa je njihov uticaj na zauzetost sistema veoma mali.

Vreme zauzetosti prostornog ili staničnog odseka odgovarajućim vozom je u funkciji brzine kretanja voza preko tog odseka. Kod staničnih odseka (koloseka) imamo i dodatno vreme zadržavanja radi bavljenja vozova u stanicama i stajalištima. Vreme fizičke zauzetosti odseka je vreme koje protekne od momenta zauzimanja odseka prvom osovinom voza do trenutka kada poslednja osovina voza napusti taj odsek. Zadržavanje vozova na odsecima može da se javi i u slučaju da signali na izlazu tih odseka pokazuju signalni znak "Stoj" (zbog zauzetosti koloseka, rasputnice ili zauzeća sledećeg prostornog odseka prethodnim vozom). U tom slučaju vozovi čekaju na signalu i povećavaju vreme zauzetosti odseka. Ukupno vreme zauzetosti je vreme u kom je odsek zauzet zbog kretanja vozova. Pored fizičke zauzetosti, obuhvata i ono vreme od kada se odsek nalazi u putu vožnje za posmatrani voz (što znači od momenta formiranja puta vožnje) do trenutka kada prva osovina voza ne stupi na taj odsek. Zatim, u ukupno vreme zauzetosti ulazi i ono vreme od trenutka napuštanja odgovarajućeg odseka pa do trenutka kada tom istom odseku može pristupiti sledeći voz.

Kategorije vozova su pojednostavljene tako da su svi vozovi jedne kategorije istih dužina, masa i vučnih karakteristika. Karakteristike koje se koriste za proračun kretanja vozova u simulaciji su dužina voza, ubrzanje i usporenje voza i maksimalna brzina (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 Karakteristike vozova za proračun vremena zauzetosti odseka

	I kategorija	II kategorija	III kategorija
dužina voza	350m	120m (garnitura)	400m
ubrzanje pri polasku	0,5m/s ²	0,5 m/s ²	0,3m/s ²
usporenje pri kočenju	0,5m/s ²	0,5m/s	0,3m/s ²
maksimalna brzina	100km/h	90km/h	80km/h

Na fizičko vreme zauzetosti odseka utiče maksimalna brzina kretanja voza preko posmatranog odseka, veličina ubrzanja ili usporenja (ukoliko se posmatrani odsek nalazi na deonici pokretanja ili zaustavljanja voza), kao i dužina prostornog odseka i dužina voza koji ga prelazi. Fizičko vreme zauzetosti računa se po sledećem obrascu:

$$t_z = \frac{L_{PO} + l_V}{V} 3,6 [s] \quad (7.1)$$

gde su:

- t_z - vreme fizičke zauzetosti prostornog odseka,
- L_{PO} - dužina prostornog odseka, [m]
- l_V - dužina voza, [m]
- V - prosečna brzina kretanja voza preko odseka, [km/h]
- 3,6 – koeficijent svođenja jedinica.

Na deonicama ubrzanja ili kočenja, vreme fizičke zauzetosti računa se kao:

$$t_z = \frac{V_2 - V_1}{3,6 a} [s] \quad (7.2)$$

gde su:

- V_2 - dostignuta brzina na kraju ubrzavanja ili brzina na početku kočenja, [km/h]
- V_1 - početna brzina pri ubrzavanju ili brzina na kraju kočenja, [km/h]
- a - veličina ubrzanja ili usporenja. [m/s²].

Na osnovu jednačina kretanja (7.1) i (7.2) i uz pomoć maksimalnih brzina kretanja na deonicama (kao i ograničenja brzina) i dužine pojedinih elemenata može se izračunati fizičko vreme zauzetosti svakog od njih.

Granice modela

Granice modela su mesta na kojima vozovi ulaze u model ili izlaze iz njega. Model je ograničen sa četiri strane: sa strane stanica Beograd centar, Karađorđev park, Rakovice i Topčidera.

Sa strane stanice Beograd centar granica ulaska u model prema Rakovici su izlazni signali stanice Beograd centar sa petog, šestog i sedmog koloseka. Prema stajalištu Karađorđev park, granica ulaska su izlazni signali stanice Beograd centar sa osmog i devetog koloseka. Granica izlaska iz modela u stanici Beograd centar su izolovani odseci drugog, trećeg i četvrtog koloseka.

Od strane stajališta Karađorđev parka ulaz u model je na izlaznom signalu stajališta Karađorđev park sa oznakom Su91, granice izlaza iz modela u stajalištu Karađorđev park je izolovani odsek na koloseku tog stajališta i on se nalazi u visini izlaznog signala Su91.

Iz pravca stanice Topčider granica ulaska u model je početak prostornog odseka kod signala Zu90. Izlaz iz modela je kraj izolovanog odseka i nalazi se na istoj kilometraži kao i granice ulaska u model iz pravca stanice Topčider.

U stanici Rakovica granice ulaska u model su izlazni signali sa koloseka 4, 5 i 6. Granice izlaska iz modela su krajevi izolovanih odseka koloseka 1, 2 i 3 odnosno izlazni signali sa prvog, drugog i trećeg koloseka.

Iz stanice Beograd centar u model ulaze vozovi prve i druge kategorije, dok vozovi treće kategorije (teretni) ne saobraćaju kroz stanicu Beograd centar.

Iz stajališta Karađorđev park u model ulaze samo vozovi druge kategorije, t.j. regionalni i gradski putnički vozovi.

Iz stanice Topčider u model ulaze vozovi sve tri kategorije. Vozovi treće kategorije iz stanice Topčider upućuju se preko stanice Rakovica ili za Resnik ili za Beograd ranžirnu.

Iz stanice Rakovica u model ulaze vozovi sve tri kategorije i to za Topčider vozovi prve, druge i treće kategorije, za Beograd centar vozovi prve i druge kategorije i za stajalište Karađorđev park vozovi druge kategorije.

Odseci u modelu

Odseci u modelu definisani su na osnovu plana prostornih odseka na prugama i u stanicama. Granice prostornih odseka predstavljaju izolovani sastavi. Svaki pojedinačni odsek se prati i kontroliše se njegova zauzetost, broj vozova koji pređe preko odseka, ukupno vreme zauzetosti odseka, kao i prosečna zauzetost odseka jednim vozom. Ovim je omogućeno praćenje kretanja vozova kao i u realnom sistemu. Skretnički odseci su definisani tako da omogućuju maksimalnu paralelnost saobraćaja, najkraće vreme zauzetosti i prijem vozova sa minimalnim putem pretrčavanja.

Red vožnje

Osnovni koncept generisanja vozova u modelu zasnovan je na proračunu intervala između polazaka vozova istog tipa na istoj relaciji. U zavisnosti od cilja primene simulacionog modela rasputnice, u modelu se mogu primeniti stvarni redovi vožnje (deterministički), stohastički podaci ili deterministički redovi vožnje sa dodatkom primarnih kašnjenja vozova. Stohastičko generisanje vozova u modelu moguće je preko ugrađenih statističkih funkcija koje se nalaze u biblioteci *ExSpect* programa ili preko spoljnih baza podataka u kojima su polasci vozova definisani stohastički. U okviru ovog rada prilikom analize uticaja rasputnice na kretanje vozova u sistemu, korišćeni su i analizirani različiti pristupi generisanju vozova u modelu. Deterministički prognozirani red vožnje korišćen je kod poređenja varijanti infrastrukturnih rešenja rasputnice (*Milinković et al., 2012a*), dok je kod analize sekundarnih kašnjenja koje nastaju na rasputnici korišćena kombinacija determinističkog reda vožnje vozova za 2011. godinu sa dodatim proračunatim primarnim kašnjenjem vozova (*Milinković et al., 2013*).

7.3.2 SAOBRAĆAJ VOZOVA U BLOKOVNOM RAZMAKU PRI APB-U

Princip organizacije saobraćaja koji se primenjuje u ovom modelu zasniva se na sleđenju vozova na zeleno svetlo. Uslovi koji su potrebni za primenu ovog načina saobraćaja vozova određeni su lokacijom signala koji se nalaze ispred rasputnice. To su signali Zu96 i Zu90, kao i prostorni signal Z32 (*Milinković, 2007*). Vozovi se pokreću i kreću kroz sistem po sledećim principima:

- vozovi iz stanice Beograd centar koji idu prema stanici Rakovica mogu se otpremiti ako su ispunjeni sledeći uslovi: otvoren signal Yu92 (i zatvoren signal Uu92) i prostorni signal Z12, slobodna dva prostorna odseka od stanice. Od pokretanja voza iz stanice Beograd centar pa do Rakovice uslov da voz može da zauzme sledeći odsek je da su dva naredna odseka slobodna. Pri ulazu u stanicu Rakovica uslov za formiranje ulaznog puta vožnje je slobodan ulazni skretnički odsek, slobodan kolosek i slobodan put pretrčavanja.
- vozovi iz stajališta Karađorđev park koji idu prema stanici Rakovica mogu se otpremiti ako su ispunjeni sledeći uslovi: slobodan signal Uu92 (i zatvoren Yu92) i slobodan prostorni signal Z12, slobodna dva prostorna odseka od stanice. Kao i kod vozova iz stanice Beograd centar i ovi vozovi moraju imati naredna dva odseka slobodna.
- vozovi iz stanice Topčider prema Rakovici mogu se otpremiti ako je zatvoren signal Zu96, otvoren signal Zu90 i ulazni signal Zu92 i slobodan ulazni skretnički deo,
- vozovi iz stanice Rakovica mogu se otpremiti ka stanici Topčider ako je zatvoren signal Zu96 i ako su slobodni odseci od izlaznih signala iz Rakovice do prostornog signala iza Rasputnice „G” prema stanici Topčider,
- vozovi iz stanice Rakovica prema stanici Beograd centar i stajalištu Karađorđev park mogu se otpremiti ako su slobodni odseci od izlaznih signala iz stanice Rakovica do signala Z41.

7.4 MODEL PETRIJEVIH MREŽA RASPUTNICE „G”

Za testiranje modela Petrijevih mreža rasputnica odabrana je rasputnica „G” koja se nalazi u beogradskom železničkom čvoru. Pri izradi simulacionog modela Petrijevih mreža rasputnice „G” vodilo se računa o sledećim ograničenjima i ulaznim podacima:

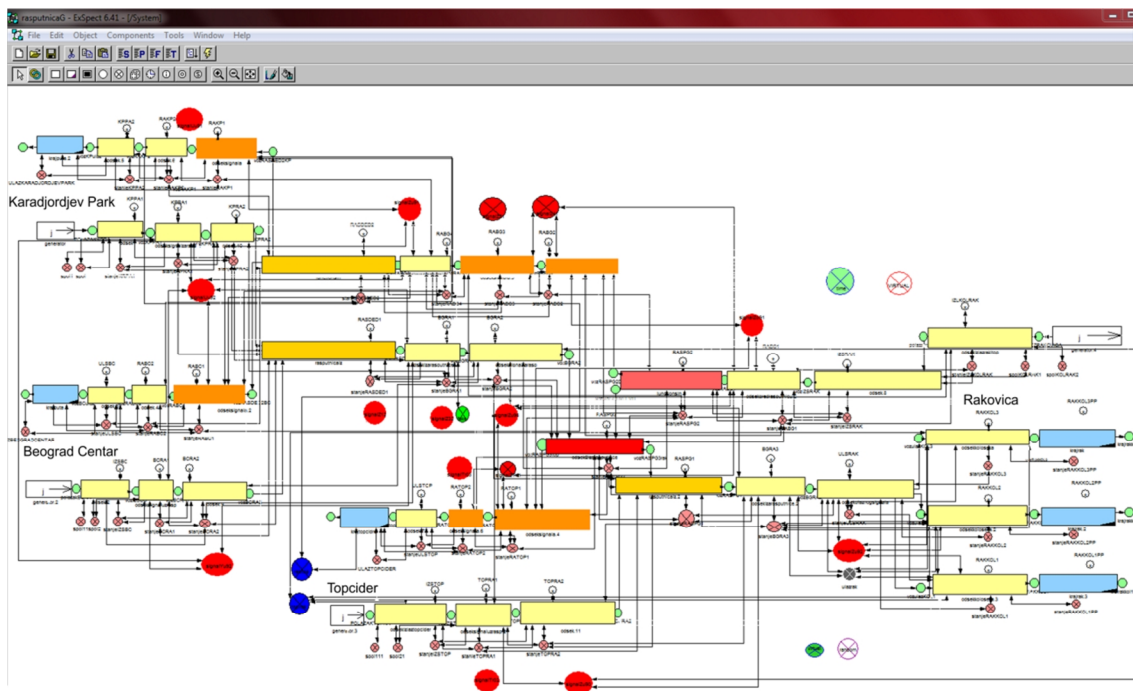
- granice modela u sistemu su koloseci stanica: Rakovica, Topčider, Beograd Centar, Karađorđev Park;

- svi principi odvijanja saobraćaja u složenom sistemu sa rasputnicom (formiranje puteva vožnji, položaj skretnica i signala) primenjeni su i u modelu;
- odseci su formirani na osnovu karakteristika pruge, položaja izolovanih sastava i mogućnosti za formiranje puteve vožnji;
- zavisnost signala i postavljanja puteva vožnji definisani su u uslovima prelaza, a stanja signala prate se u skladištima signala;
- definisani parametri u modelu mogu biti vezani za odsek ili za token/voz. Parametri za odsek definišu tip odseka, njegovo ime, dužinu itd. Parametri vezani za voz definišu se inicijalno kod učitavanja vozova u model, a zatim se tokom kretanja voza menjaju;
- pri izradi modela rasputnice korišćena su dva načina generisanja vozova:
 - po taktom redu vožnje, gde su vozovi generisani jedan za drugim u konstantnom intervalu (od 1, 5, 10, 15 i 20 minuta). Ovaj način simulacije koristi se najčešće za testiranje rada modela i za testiranje i ispitivanje sistema rasputnice. Kod ovakvog načina generisanja vozova moguće je uočiti ispravnost koncepta modela rasputnice jer se u ovako malom vremenskom intervalu lako uoči bilo kakvo odstupanje od uobičajenog ponašanja sistema. Kod ispitivanja sistema ovo je jedan od načina da se utvrdi kako se sistem ponaša kada je preopterećen i koja su uska grla sistema, odnosno gde su ograničenja propusne moći;
 - deterministički red vožnje koji je kreiran po redu vožnje vozova za 2011. godinu. Ovaj red vožnje vozova u model se učitava iz *Excel* baze podataka;

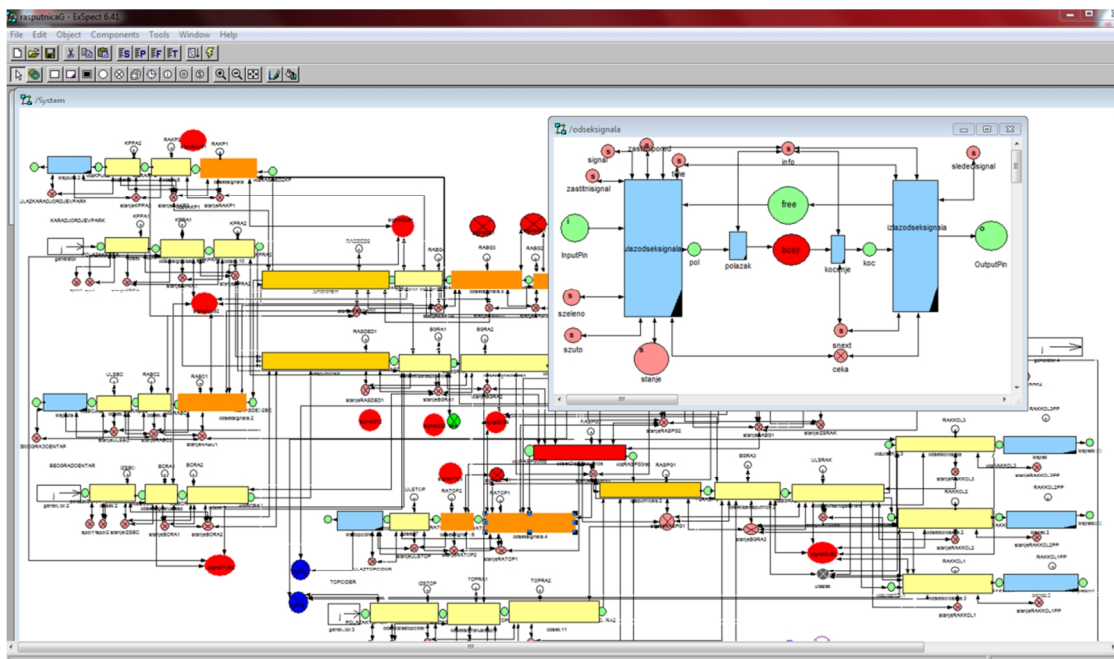
Nakon prikupljanja i pripreme svih ulaznih podataka i informacija o radu sistema, pristupa se izradi modela Petrijeve mreže visokog nivoa (HLPN) rasputnice „G“. Dakle, izrada modela rasputnice izvodi se po sledećim koracima:

- analiza i obrada podataka o sistemu rasputnice;
- u programu modela formirati i oblikovati niz modula koji predstavljaju različite tipove odseka koji se pojavljuju u planu odseka sistema rasputnice;

- povezati međusobno sve module kreirajući Petrijevu mrežu;
- u modelu definisati sva skladišta (*Store*) koja predstavljaju signale, stanja odseka i sl. ;
- svako skladište odseka povezati sa dodeljenim odsekom i uneti podatke tipa *info*;
- povezati sva skladišta odseka, kao i skladište *time* (časovnik simulacije) i skladište *random* (slučajni brojevi);
- definisati ulazne baze podataka (*Excel* ili *txt*) koji sadrže podatke o vozovima u modelu (ulazni podaci koji će se dodeliti tokenu kao tip *voz*);
- definisati fajlove u kojima će se snimati izlazni podaci dobijeni tokom simulacije (*Excel* ili *txt*);
- po rasporedu odseka iz planom odseka kreirati prozor za animaciju toka izvršenja i stanja zauzetosti odseka modela.



Slika 7.3 HLPN model rasputnice „G“



Slika 7.4 Detalj HLPN modela rasputnice „G“ sa modulom odseka

Rezultat izvršenih koraka u izradi model je graf Petrijeve mreže prikazan na Slikama 7.3 i 7.4. Pri pokretanju simulacije, mreža prvo generiše sve tokene koji će se pojaviti u modelu i svakom tokenu dodeljuje boju, tj. dodeljuje informacije tipa *voz* koje su preuzete iz baze ulaznih podataka. Nakon toga, tokeni se pojavljuju na granici modela kada se vreme iz tipa *voz* poklopi sa stanje časovnika simulacije. Tok izvršenja simulacije može se pratiti na ekranu posmatrajući kretanje tokena kroz mrežu, posmatrajući pokazivače stanja uređaja u modelu i posmatrajući prozor za animaciju gde se grafički prikazuje stanje zauzetosti svakog od odseka u modelu. U toku simulacije, procesi kretanja vozova kroz model mogu se posmatrati neprekidno od početka pa do kraja simulacije. U svakom trenutku simulacija se može zaustaviti ili upravljati tokom izvršenja simulacije tako što se (određenom komandom) simulacija prati po koracima izvršenja u skladu sa diskretnom prirodom modela. Proces simulacije može se i modifikovati tako što, nakon zaustavljanja sistema u određenom stanju, možemo učitati nove podatke u model ili izmeniti postojeće. Nakon izvršenja simulacije modela rasputnice rezultati se mogu pregledati u bazi izlaznih podataka (*Excel*). Ti podaci kasnije se mogu oblikovati u izveštaje, grafikone, grafičke skice ili tabele.

Verifikacija i validacija HLPN modela rasputnice "G"

Validacija je potvrda da je model napravljen/osmišljen u skladu sa karakteristikama stvarnog sistema, a verifikacija je potvrda da simulacioni računarski program radi po zatom modelu. Iz ovih definicija vidi se da je nekad teško izvršiti validaciju modela, jer on se najčešće formira kao mentalni ili konceptualni model sistema. Program *ExSpect* ima nekoliko mogućnosti za verifikaciju i validaciju modela rasputnice. Često se u stanicama ili u telekomandama kontroliše i upravlja saobraćajem vozova pomoću šeme pruga i stanica koja predstavlja stanja zauzetosti odseka. Taj koncept primenjen je i u ovom modelu. Ponašanje modela za različite ulazne podatke prati se preko animacije zauzetosti odseka. Dodatna analiza i provera vrši se preko baze izlaznih podataka gde se preko upita grafički i tabelarno predstavljaju rezultati simulacije. Prvi korak u proveru modela je ispitivanje kretanja vozova pri taktom redu vožnje sa minimalnim intervalom sleđenja. Simulacija gde se model ispituje na granici propusne moći omogućava da animacija i grafikon saobraćaja vozova ukažu na nepravilnosti u radu simulacionog modela. Na ovaj način, validacija modela se vrši poređenjem izlaznih rezultata modela sa ponašanjem stvarnog sistema. Na Slici 7.5 prikazan je prozor animacije na kome se prati tok simulacije.



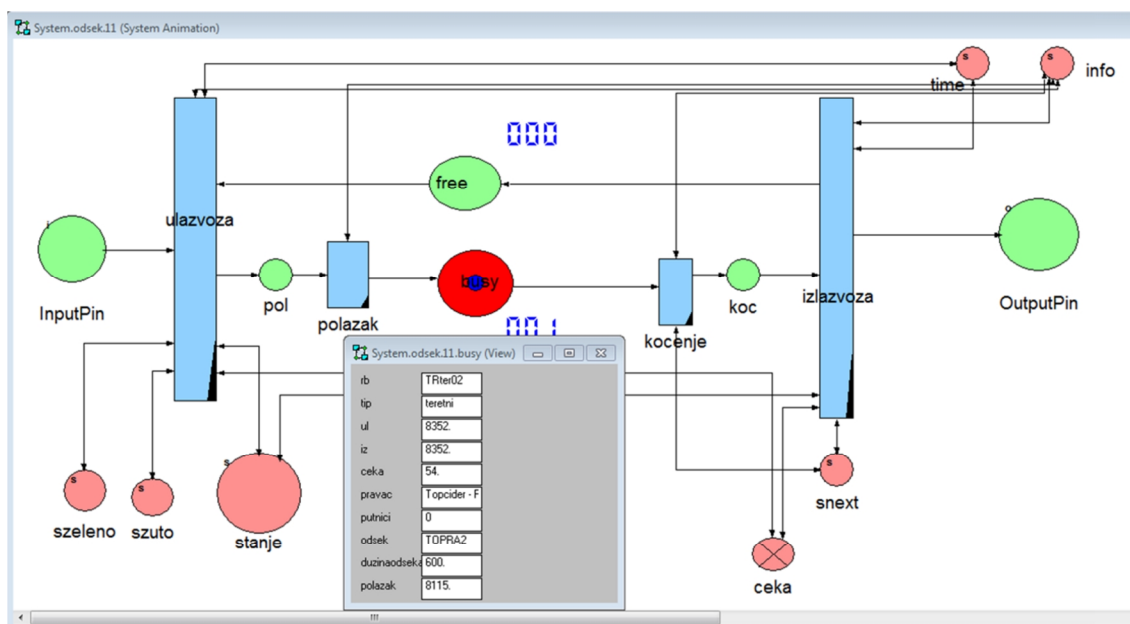
Slika 7.5 Animacija stanja odseka u modelu rasputnice „G“

Izlazni rezultati modela koriste se za verifikaciju i validaciju preko animacije, praćenja tokena u modelu, analize tabelarno prikazanih rezultata, grafikona saobraćaja vozova i preko indikatora stanja mesta.

Animacija stanja zauzetosti odseka u modelu prikazana je na Slici 7.5. Ova animacija zasnovana je na vizuelnom konceptu komandnog pulta u staničnim postavicama, gde se preko kolosečne šeme i boje kojom je obeležen indikator odseka vidi stanje odseka i kretanje voza kroz sistem.

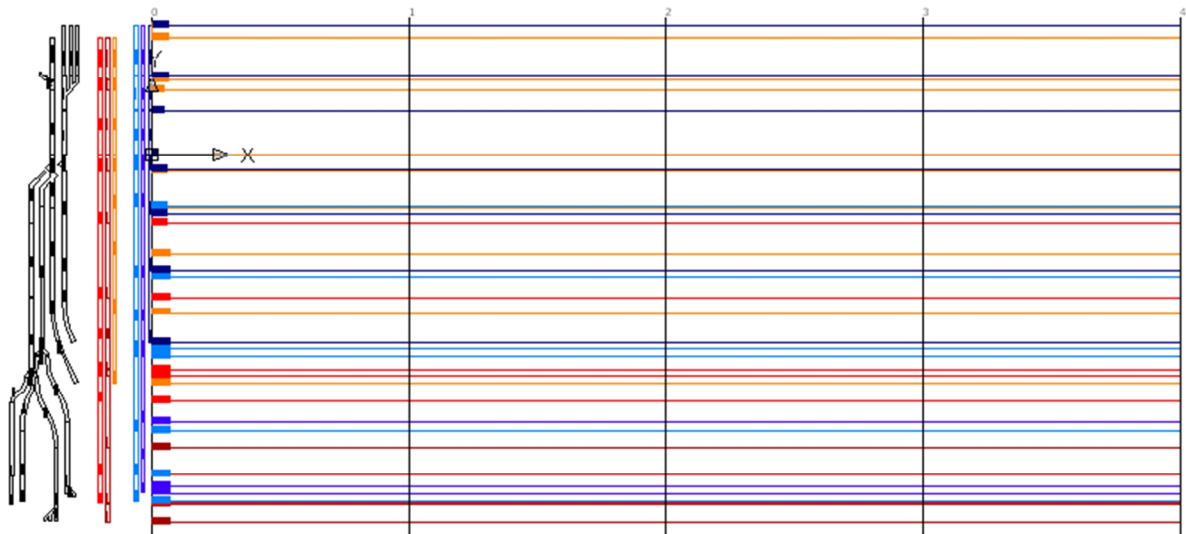
Tokeni se mogu pratiti u toku izvršenja simulacije. Na ovaj način moguće je pratiti kretanje i zadržavanje tokena u mestima (kretanje vozova), ali i drugih tokena čiji je zadatak manipulacija podacima tipa *voz* i *info*. Takođe, prilikom prekida izvršenja simulacije (u određenom vremenskom trenutku ili događaju), može se analizirati pozicija i trenutni podaci koji se u tokenu nalaze u tipu *voz*. Na ovaj način, za vreme trajanja simulacije može se doći do podataka o trenutnom statusu određenog voza.

Lokacija tokena i trenutno stanje odseka može se pratiti u toku simulacije preko indikatora stanja mesta. Indikatori se nalaze neposredno uz mesto i mogu da prikazuju trenutni broj tokena i podatke tipa *voz* za poslednji token koji je prispeo (Slika 7.6).



Slika 7.6 Animacija tokena i indikatori stanja mesta

Za analizu izlaznih podataka razvijen je i model za kreiranje grafičkih prikaza rezultata simulacije. U bazi izlaznih podataka simulacije, na osnovu prikupljenih rezultata, generiše se prethodno programiran programski kod (makro). Rezultat programskog koda je skup naredbi za crtanje grafikona reda vožnje u *AutoCadu*.



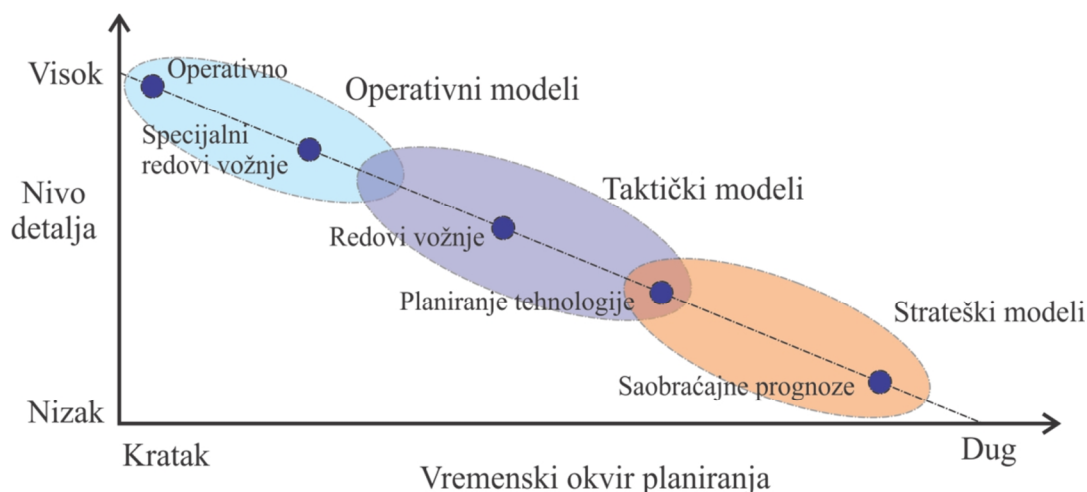
Slika 7.7 Podloga za crtanje grafikona izvršenja toka simulacije

Na taj način, koristi se uobičajeni format prikaza kretanja vozova pomoću trasa u grafikonu tipa vreme - rastojanje (*time/distance*). Da bi se ovaj pristup efikasno primenjivao, podloga grafikona je unapred pripremljena u *AutoCadu*(slika 7.7). Po vertikalnoj osi u razmeri su predstavljeni odseci simulacionog modela, a na horizontalnoj osi predstavljeno je vreme. Prilikom izvršenja makro programa, trase vozova iz modela ucrtavaju se na podlogu. Trase vozova u grafikonu razlikuju se u zavisnosti od kategorije i pravca kretanja pa se prilikom crtanja grafikona trase definišu linijama različite debljine i boje. Takođe, u programskom kodu definisano je crtanje trasa tako da svaka relacija ima svoj *layer*.

8 REZULTATI I ANALIZA REZULTATA

8.1 UVOD

Model Petrijevih mreža složenog železničkog saobraćajnog sistema ima razne mogućnosti primene u analizi i planiranju sistema. Karakteristike modularnosti, hijerarhije, stohastičnosti kao i mogućnost povezivanja sa spoljnim bazama podataka, omogućavaju lako adaptaciju modela, široku primenu i jednostavan pregled i analizu dobijenih rezultata. Nivo detalja i način primene modela Petrijeve mreže u simulaciji železničkog sistema zavisice od ciljeva simulacije. Rezultati dobijeni predloženim simulacionim modelom Petrijevih mreža mogu da se upotrebe na različite načine u zavisnosti od toga na kom nivou planiranja će se koristiti (Slika 8.1) (Landex, 2008). Planiranje u železničkom saobraćaju obično se definiše po kriterijumu vremena, pa je i najčešća podela na strateško, taktičko, operativno i kratkoročno planiranje (Maroti, 2006).



Slika 8.1 Zavisnost nivoa apstrakcije modela od ciljeva simulacije

Strateško planiranje bavi se donošenjem odluka nekoliko godina unapred. Cilj planiranja je određeni nivo kvaliteta i usluga uzimajući u obzir raspoložive resurse. Pri izradi strateškog plana reda vožnje vozova najvažnija odluka je o broju i karakteristikama linija vozova. Potrebno je uzeti u obzir stohastičke promene koje se mogu desiti u budućnosti i izvršiti kvalitetnu prognozu buduće potražnje za prevozom, kao i sagledati sve moguće resurse. Prvi korak kod strateškog planiranja reda vožnje je izrada matrice putovanja putnika, a zatim na osnovu nje treba odrediti potrebu za voznim linijama (broj, raspodela i frekvencija vozova na određenim relacijama) (*Čičak i Vesković, 2005*).

Taktičko planiranje se odnosi na planiranje u vremenskom okviru od dva do dvanaest meseci. Cilj taktičkog planiranja može biti taktički red vožnje koji se definiše za određene uslove ili određene periode. Ovde se može uočiti i potreba za operativnim upravljanjem jer se mnogo više detalja uzima u obzir. Primena taktičkog planiranja najčešća je kod redova vožnje u putničkom saobraćaju. Pri taktičkom planiranju reda vožnje najčešće se postojeći red vožnje koji je zasnovan na dnevnom ciklusu analizira u skladu sa varijacijama u različitim vremenskim okvirima.

Operativno planiranje se može koristiti kod planiranja u vremenskom periodu od tri dana do dva meseca. U ovom slučaju plan koji je dobijen strateškim ili taktičkim planiranjem analizira se i modifikuje u skladu sa trenutnim ili prognoziranim stanjem u sistemu. Ovde se u obzir uzimaju različite potrebe za prevozom koje mogu nastati u različitim situacijama koje se ne mogu unapred predvideti. To su, na primer, sportski ili kulturni događaji, vanredne okolnosti nastale zbog rekonstrukcije ili održavanja pruga i puteva i slično. Pri operativnom planiranju važno je brzo doći do rešenja. Najčešće se pri operativnom planiranju posmatra kako se ponaša modifikovani red vožnje pri novim uslovima saobraćaja. Kod kratkoročnog planiranja, planira se do tri dana i posmatraju se akcije upravljanja saobraćajem u realnom vremenu. Ovo planiranje zahteva brzo reagovanje tako da nema vremena za proračune koji bi dali optimalna rešenja već se samo ispituju i primenjuju najbolja iz grupe raspoloživih rešenja. U saobraćaju vozova kod kratkoročnog planiranja odluke donosi dispečer za situacije kada dolazi do velikih poremećaja saobraćaja usled kašnjenja ili otkazivanja vozova.

8.2 PRIMENA SIMULACIONOG MODELA RASPUTNICE ZA OPERATIVNU I TAKTIČKU ANALIZU

Upotreba simulacije kao podrška u donošenju operativnih i taktičkih odluka podrazumeva da model mora obezbedi specifične uslove. Ti uslovi vezani su za mogućnosti primene simulacije i za određeni format rezultata i analiza.

Prvo, kod primene modela, važno je da model omogućava lako manipulisanje ulaznim podacima i da te izmene ne oduzimaju puno vremena. U modelu Petrijevih mreža, ulazni podaci su definisani u eksternoj bazi poznatog formata (*Excel*), pa je vrlo lako izvršiti izmene. Drugo, simulacija mora da bude prilagođena za eksperimentisanje. Prilikom eksperimentisanja, programer ispituje reakcije modela na izmenu tokena. Pri tome, u toku izvršenja simulacije, tokeni se mogu izbrisati iz mesta (otkazivanje voza), mogu se dodavati u mesto (uvođenje novog voza), ili se mogu vrednosti tokena u tipu *voz* (promena vremena polaska voza). Ove karakteristike omogućavaju da se model koristi za ispitivanje uticaja određenih operativnih ili taktičkih odluka na saobraćaj vozova u sistemu.

Kod primene u operativnom odlučivanju, važno je da simulacioni model predstavi rezultate u formatu koji se može lako i efikasno tumačiti. Ti rezultati najčešće treba da predstavljaju uticaj promene reda vožnje jednog ili nekoliko vozova na ostale vozove u sistemu. Ove analize najčešće traže odgovor na pitanje kako će uvođenje ili promena vremena polaska nekog voza uticati na saobraćaj ostalih vozova. Prema tome, najbolji način za prikaz rezultata simulacije je pomoću grafikona saobraćaja vozova i tabelarno za određene vozove. Model Petrijevih mreža omogućava oba načina tako što se izlazni rezultati iz eksternih baza adaptiraju na određeni format.

Takođe, analize se mogu raditi i za stanja zauzetosti odseka. Odseci mogu da se nalaze u jednom od tri stanja zauzetosti: slobodni, slobodni ali sa ograničenom brzinom (odsek ispred ovog odseka u putu vožnje voza je zauzet) ili zauzet odsek. Zauzetost odseka može biti fizička ili ukupna. Fizička zauzetost je vreme kada se voz fizički nalazi na odseku. Ukupna zauzetost je uz fizičku zauzetost odseka, vreme koje odsek provede blokirano u putu vožnje voza koji se nalazi na susednom odseku.

Nakon završene simulacije, u bazi izlaznih podataka mogu se sprovesti različite analize koristeći mogućnosti *Excela*. Filtriranje podataka može se vršiti po vozu (Slika 8.3), po odseku (Slika 8.4), po relaciji voza, kategoriji voza itd. Na Slikama 8.3 i 8.4 vidi se vreme ulaza i izlaza sa odseka kao i da li je postojalo čekanje na odseku. Ovi podaci mogu se kasnije lako statistički obraditi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	PRAVAC	RB	DUZINA ODSEKA	TIP	UL	CEKA	IZ	ODSEK	POLAZAK	
130	Beograd Centar - R	501	0	putnicki	0	0	0	30000	polazak iz Beograd	30000
870	Beograd Centar - R	501	100	putnicki	30000	0	0	30007	IZSBC	30000
875	Beograd Centar - R	501	899	putnicki	30007	0	0	30072	BCRA1	30000
880	Beograd Centar - R	501	927	putnicki	30072	0	0	30139	BCRA2	30000
881	Beograd Centar - R	501	100	putnicki	30139	0	0	30146	RASDED1	30000
883	Beograd Centar - R	501	1008	putnicki	30146	0	0	30218	BGRA1	30000
885	Beograd Centar - R	501	980	putnicki	30218	0	0	30289	BGRA2	30000
887	Beograd Centar - R	501	500	putnicki	30289	0	0	30325	RASPG3	30000
890	Beograd Centar - R	501	220	putnicki	30325	0	0	30341	RASPG1	30000
892	Beograd Centar - R	501	614	putnicki	30341	0	0	30385	BGRA3	30000
893	Beograd Centar - R	501	487	putnicki	30385	0	0	30420	ULSRAK	30000
898	Beograd Centar - R	501	695	putnicki	30420	206	0	30626	RAKKOL3	30000
5001										

Slika 8.2 Tabelarni pregled podataka u Excelu sa filtriranjem po vozu

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	PRAVAC	RB	DUZINA ODSEKA	TIP	UL	CEKA	IZ	ODSEK	POLAZAK	
197	Topcider - Rakovici	51001	614	teretni	253	0	0	302	BGRA3	0
222	Topcider - Rakovici	51007	614	teretni	3853	0	0	3902	BGRA3	3600
232	Topcider - Rakovici	52003	614	teretni	4408	0	0	4456	BGRA3	4200
239	Topcider - Rakovici	51011	614	teretni	6208	0	0	6256	BGRA3	6000
252	Topcider - Rakovici	51013	614	teretni	7453	0	0	7502	BGRA3	7200
262	Topcider - Rakovici	52005	614	teretni	8008	0	0	8056	BGRA3	7800
269	Topcider - Rakovici	51015	614	teretni	8608	0	0	8656	BGRA3	8400
291	Topcider - Rakovici	51019	614	teretni	11053	0	0	11102	BGRA3	10800
301	Topcider - Rakovici	51023	614	teretni	13408	0	0	13456	BGRA3	13200
357	Karadjordjev Park -	8001	614	beovoz	16549	0	0	16593	BGRA3	16200
364	Topcider - Rakovici	51029	614	teretni	17008	0	0	17056	BGRA3	16800
392	Beograd Centar - R	6001	614	beovoz	18341	0	0	18385	BGRA3	18000
440	Karadjordjev Park -	3613	614	beovoz	19849	0	0	19893	BGRA3	19500
448	Topcider - Rakovici	701	614	putnicki	19989	0	0	20033	BGRA3	19800
455	Karadjordjev Park -	8003	614	beovoz	20149	0	0	20193	BGRA3	19800
468	Beograd Centar - R	803	614	putnicki	20741	0	0	20785	BGRA3	20400
517	Beograd Centar - R	6003	614	beovoz	21941	0	0	21985	BGRA3	21600
587	Beograd Centar - R	3401	614	beovoz	23141	0	0	23185	BGRA3	22800
613	Karadjordjev Park -	8005	614	beovoz	23749	0	0	23793	BGRA3	23400
638	Beograd Centar - R	103	614	putnicki	24041	0	0	24085	BGRA3	23700
662	Beograd Centar - R	601	614	putnicki	24341	0	0	24385	BGRA3	24000
693	Beograd Centar - R	3201	614	beovoz	25241	0	0	25285	BGRA3	24900
704	Beograd Centar - R	3301	614	beovoz	25541	0	0	25585	BGRA3	25200
714	Beograd Centar - R	6005	614	beovoz	25841	0	0	25885	BGRA3	25500
719	Topcider - Rakovici	3403	614	beovoz	25989	0	0	26033	BGRA3	25800
791	Karadjordjev Park -	8007	614	beovoz	27349	0	0	27393	BGRA3	27000
800	Topcider - Rakovici	809	614	putnicki	27530	0	0	27574	BGRA3	27300
817	Topcider - Rakovici	105	614	putnicki	27835	0	0	27879	BGRA3	27600
854	Beograd Centar - R	6007	614	beovoz	29141	0	0	29185	BGRA3	28800
876	Karadjordjev Park -	3013	614	beovoz	30049	0	0	30093	BGRA3	29700
892	Beograd Centar - R	501	614	putnicki	30341	0	0	30385	BGRA3	30000
911	Karadjordjev Park -	8009	614	beovoz	30949	0	0	30993	BGRA3	30600
916	Beograd Centar - R	3603	614	beovoz	31099	0	0	31143	BGRA3	30600

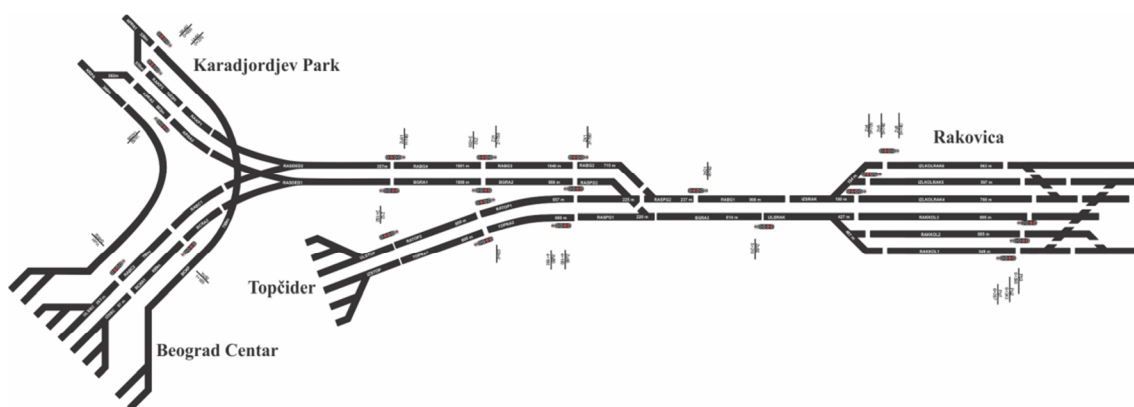
Slika 8.3 Tabelarni pregled podataka u Excelu sa filtriranjem po odseku

S obzirom da model rasputnice ima mogućnost da prati stanja *mesta*, stanja skladišta u modelu i vrednosti parametara koja su dodeljena *tokenima*, ali i da sve te vrednosti mogu da se u toku izvršenja simulacije direktno upisuju u unapred definisanu bazu podataka, praktično je moguća vrlo detaljna analiza rada modela sistema. Za železničke sisteme interesantna je karakteristika ovog modela da *tokenu* mogu da se dodele i u toku kretanja kroz model promene bilo koji parametri. U ovom modelu uz

parametre koji očitavaju ime odseka na kom boravi voz, vreme ulaska i izlaska na/sa odseka i vremena zadržavanja na odseku, definisan je još jedan parametar koji u ovom modelu nije korišćen zbog veličine modela, a to je parametar koji prati broj putnika u vozu kod putničkih vozova. Ovaj parametar bi bio veoma interesantan za primenu u modelima većeg sistema za simulaciju tokova putnika (čvor, pruga i sl.).

Rezultati i testiranje na primeru analize sekundarnih kašnjenja

Model Petrijevih mreža testiran je na delu beogradskog železničkog čvora sa stanicama Rakovica, Topčider, Karađorđev park i Beograd Centar (Slika 8.5). Cilj modela je ispitivanje pojave sekundarnih kašnjenja u sistemu.

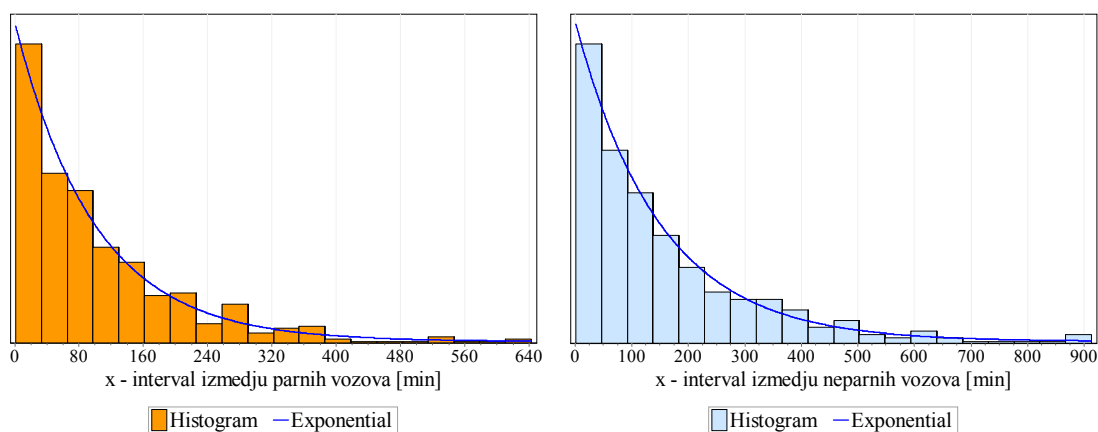


Slika 8.4 Šema izolovanih odseka sistema rasputnice „G“

Ulazni podaci o polasku putničkih vozova definisani su za stvarni red vožnje za 2010. godinu uz dodatak primarnih kašnjenja proračunatih modelima predstavljanim u Tački 5. Za stanice Rakovica i Topčider primarna kašnjenja se računaju u modulu fazi Petrijeve mreže koji predstavlja ANFIS model kašnjenja vozova. Rezultati dobijeni ANFIS modelom imaju visoku korelaciju sa stvarnim kašnjenjima u tim stanicama (Poglavlje 5). Za stanice Beograd Centar i Karađorđev Park, ANFIS model nije dao dobre rezultate. Broj putničkih vozova u ovim stanicama je mali i mnogi ekstremni podaci – outlejeri (*eng. outlier* – podatak koji se nalazi na nenormalnoj udaljenosti od ostalih vrednosti u slučajnom uzorku iz populacije) čine da podaci koji se dobijaju primenom ANFIS modela nisu precizni. Za ove stanice model kašnjenja putničkih vozova definisan je na osnovu Mamdani fazi sistema koristeći ekspertsko znanje o kretanju vozova.

Najveći uzrok poremećaja u sistemu je saobraćaj teretnih vozova koji ne saobraćaju po fiksnom redu vožnje već saobraćaju po potrebi. Prema tome, dolazak teretnih vozova u sistem ne može se opisati deterministički već stohastički. Dosadašnja istraživanja u mnogim stanicama železnica sveta i naših železnica, pokazala su da se raspodela intervala dolaska vozova u tehničke stanice najčešće ponaša po eksponencijalnom ili zakonu Erlanga drugog reda ili trećeg reda (Čičak, 2003).

Statistička analiza intervala između nailazaka teretnih vozova urađena je za stanicu Rakovica po smerovima (parni i neparni) u toku jula 2010. godine. U tom periodu, u neparnom smeru (ka severu) kroz Rakovicu je prošlo 297 teretnih vozova, a u suprotnom smeru 450 vozova. Prosečan interval između dva teretna voza je 150 minuta za vozove ka severu i 99 minuta za vozove ka jugu. Histogrami intervala između nailazaka vozova prikazani su na Slici 8.5.

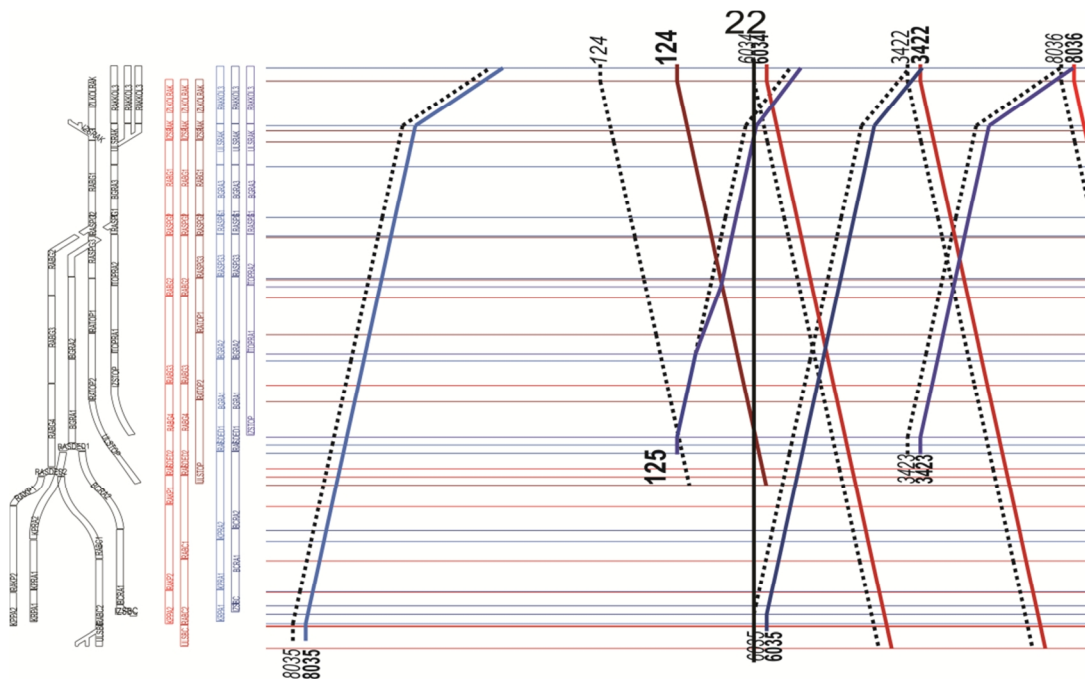


Slika 8.5 Histogram intervala između nailazaka teretnih vozova u Rakovici

Statistička analiza i neparametarski testovi (Hi kvadrat i Kolmogorov-Smirnov) ukazuju da ne postoji razlog za odbacivanje hipoteze da se uzorci ponašaju po eksponencijalnoj raspodeli sa parametrom $\lambda=0,01009$ kod parnih i $\lambda=0,0066$ kod neparnih vozova. Na osnovu prethodno opisanih analiza definisan je generator vozova u simulacionom modelu sa eksponencijalnom raspodelom. Za parni smer, srednja vrednost između nailazaka teretnih vozova je $M(x)=1/\lambda=99$ min, a za neparni smer je $M(x)=1/\lambda=150$ min. Ove vrednosti, zapravo, definišu prosečan dnevni broj teretnih vozova: u parnom smeru 15 vozova, a u suprotnom 10 vozova dnevno.

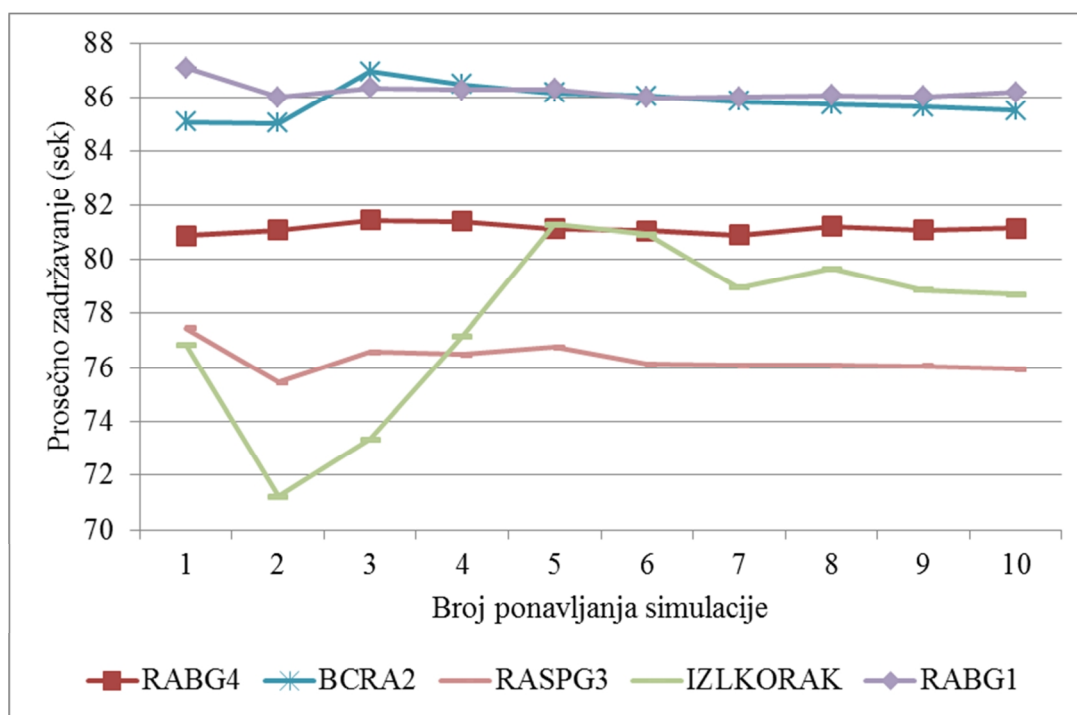
Dakle, ulazni podaci u simulacioni model su: red vožnje vozova za 2010. godinu, generator teretnih vozova po eksponencijalnoj raspodeli, podaci o infrastrukturi (uključujući dužine odseka, plan odseka, ograničene brzine i trase vozova), parametre za FPN modul koji se koriste za proračun kašnjenja svakog pojedinačnog voza i početno markiranje Petrijeve mreže. Modul fazi Petrijeve mreže proračunava kašnjenje putničkog voza pri ulasku u simulacioni model.

Prenošenje kašnjenja na druge vozove može prouzrokovati lančana sekundarna kašnjenja. Simulacijom saobraćaja vozova mogu se utvrditi potencijalna mesta konflikta trasa vozova. Model identifikuje odseke na kojima se stvaraju dodatna sekundarna kašnjenja vozova, kao i vozove koji učestvuju u konfliktnim situacijama. Podaci o sekundarnom kašnjenju dobijaju se analizom grafikona saobraćaja vozova koji se generiše iz rezultata simulacije. Slika 8.6 predstavlja deo grafikona saobraćaja vozova za odseke u modelu gde su isprekidanim linijama obeležene trase vozova planirane po redu vožnje vozova, a neprekidnim linijama su obeležene trase vozova sa dodatim kašnjenjem proračunatim u modulu fazi Petrijeve mreže. Kao što se vidi sa Slike 8.5, primarno kašnjenje voza broj 124 utiče na kretanje voza broj 125. Voz 125 ima sekundarno izazvano kašnjenje zbog konflikta sa trasom voza 124 na odseku TOPRA1 zbog čekanja na taj voz da oslobodi odseke rasputnice G.



Slika 8.6 Deo grafikona saobraćaja vozova na rasputnici „G“

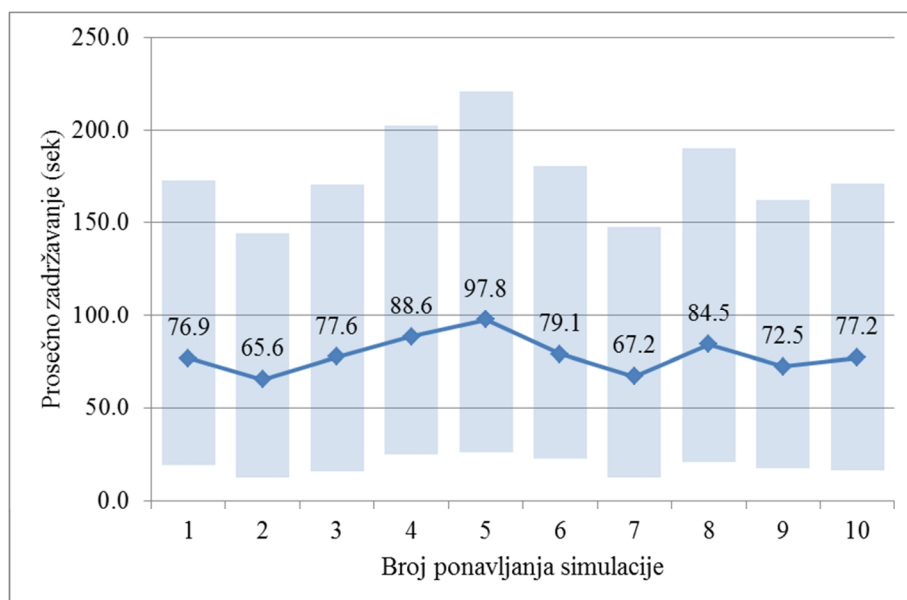
Podaci o prosečnoj zauzetosti odseka mogu ukazati na moguća uska grla u sistemu. Da bi se otkrili odseci sa najvećom zauzetošću, proračunata je prosečna zauzetost za svaki odsek u sistemu. Za deset replikacija simulacije izračunata je prosečna zauzetost odseka sa relativnom greškom manjom od 0,05 i sa stepenom pouzdanosti od 95 procenata. Odseci sa najvećim procentom ukupne zauzetosti su: RABG1 (4.6%), RASPG3 (4.5%), RASPG2 (3.2%), TOPRA1 (3.3%) i RASPG1 (3.0%). Ovi odseci su odseci rasputnice i odseci oko rasputnice (Slika 8.4). Na Slici 8.7 prikazana je promena prosečnog zadržavanja vozova na pojedinim odsecima po replikama simulacije.



Slika 8.7 Zauzetost pojedinih odseka u 10 replika simulacije

Osim kod izlaznih koloseka iz stanice Rakovica IZLKOLRAK, kod ostalih odseka ne postoje značajne razlike u rezultatima simulacije po replikama. Rasputnica G nalazi se vrlo blizu stanice Rakovica. Zbog presecanja puteva vožnji na rasputnici, ne mogu se istovremeno odvijati vožnje vozova iz stanice Rakovica ka Topčideru i vožnje iz Beograd Centra i Karađorđevog Parka ka Rakovici. S obzirom da najviše teretnih vozova saobraća prema Topčideru, a njihovi polasci su stohastički, očekivano je da na izlaznim kolosecima Rakovice dođe do najvećih varijacija u zadržavanju na odseku (Slika 8.8).

Rezultati dobijeni replikacijom simulacionog modela pokazuju da, sa relativnom greškom od 0,007 i sa intervalom pouzdanosti od 95 procenata, da je ukupna zauzetost jednim vozom odseka RABG1 u intervalu [85.6, 86.8] sekundi. Najveći deo sekundarnih kašnjenja se generiše na odseku IZLKOLRAK za vozove koji se otpremaju iz stanice Rakovica (Slika 8.8).



Slika 8.8 Prosečno zadržavanje na IZLKOLRAK sa intervalom pouzdanosti

Prosečno sekundarno kašnjenje vozova koji se otpremaju iz Rakovice je 27 sekundi, a prosečno sekundarno kašnjenje po jednom vozu u sistemu je 18 sekundi. Analiza podataka iz deset nezavisnih replikacija pokazuje da iako vozovi imaju velika primarna kašnjenja, ne postoje uska grla u sistemu. Razlog za to je mali broj putničkih i teretnih vozova. Čak i pri velikim primarnim kašnjenjima putničkih vozova i stohastičkom ponašanju teretnih vozova, ne postoje značajna sekundarna kašnjenja zbog male iskorišćenosti sistema.

8.3 PRIMENA SIMULACIONOG MODELA RASPUTNICE ZA STRATEŠKO PLANIRANJE

Upotreba modela Petrijevih mreža u strateškom planiranju efikasna je samo za manje sisteme, dok je kod većih sistema (makroskopska simulacija) znatno složenije izraditi model zbog kompleksnog grafa Petrijevih mreža. Zbog toga, model se ne može efikasno primenjivati za analize i prognoze saobraćajnih tokova i slične probleme na mreži pruga. Sistem rasputnice nije veliki jer je ograničen susednim stanicama. Kod primene u strateškom planiranju, model se može koristiti za analizu infrastrukturnih rešenja na saobraćaj vozova u sistemu. Za potrebe ovog rada model Petrijevih mreža korišćen je za analizu uticaja različitih infrastrukturnih rešenja rasputnice na saobraćaj vozova na dvokolosečnoj pruzi u delu beogradskog železničkog čvora između stanica Rakovica, Topčider, Beograd Centar i Karadorđev Park (*Milinković et al., 2012a*).

Sekundara kašnjenja najčešće nastaju na mestima konflikta puteva vožnji vozova kada dva ili više vozova zahteva korišćenje istog odseka. Rasputnica na otvorenoj pruzi je tipično mesta na kojem dolazi do presecanja puteva vožnji. Ukoliko u sistemu saobraća veći broj vozova i ukoliko su trase vozova gusto raspoređene, primarna kašnjenja mogu da izazovu dodatna kašnjenja i poremete saobraćaj vozova. Težnja železnica da ponudi kvalitetnije usluge pokrenula je pitanje opravdanosti izmene sistema rasputnice, a da bi se smanjili njeni negativni efekti na propusnu moć i kašnjenje vozova. Optimizacija sistema rasputnice može se izvesti organizacionim i tehnološkim merama koje se koriste pri upravljanju saobraćajem vozova. Efekti ovih mera daju ograničene rezultate i to samo kada ne postoji gust saobraćaj i kada je broj vozova relativno mali. Kada postoji povećan broj vozova i kada je iskorišćenost propusne moći velika, moraju se razmatrati i rešenja vezana za modifikaciju infrastrukture: novi koloseci, nove skretnice, slepi koloseci, razmeštaj signala i denivelacija rasputnice. Rešenje sa boljom kolosečnom šemom može povećati propusnu moć i ukloniti usko grlo koje nameće rasputnica.

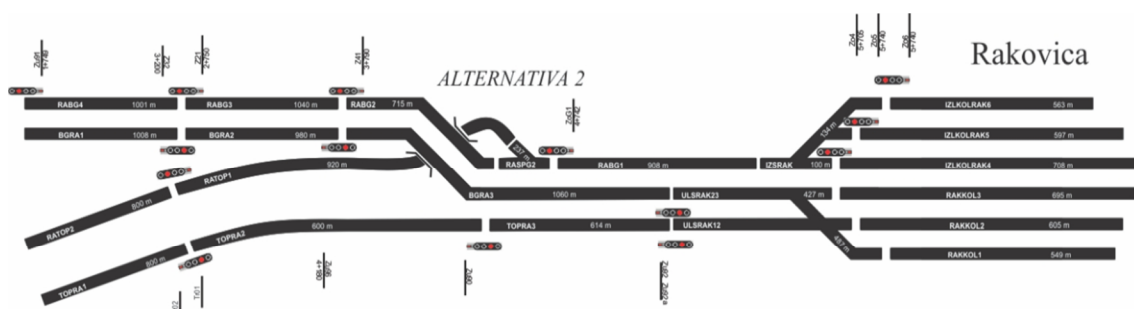
Ispitana su tri infrastrukturna rešenja rasputnice: postojeće stanje (alternativa I), delimično denivelisana (alternativa II) i denivelisana rasputnica (alternativa III).

Alternativa I je sadašnja kolosečna šema rasputnice „G“ u kojem se spajaju dve dvokolosečne pruge (Slika 8.9).



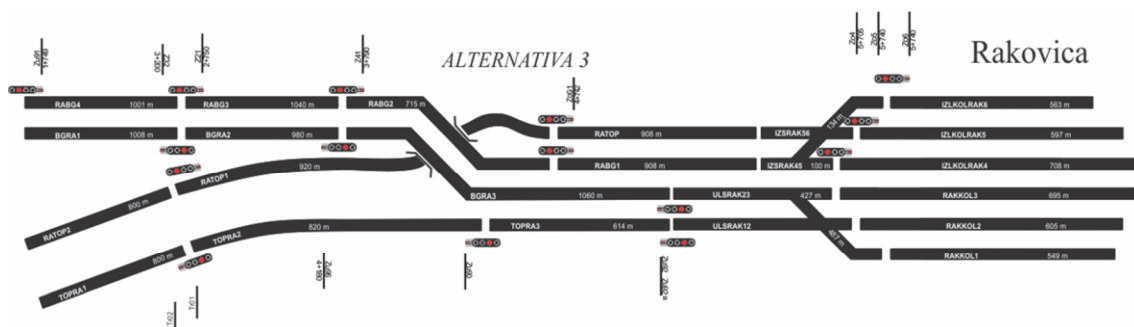
Slika 8.9 Šema izolovanih odseka rasputnice „G“ za Alternativu I

U Alternativi II, rasputnica je delimično denivelisana tako da su denivelisani koloseci u ulivnom smeru prema stanici Rakovica. U novom rešenju, pruge iz Beograd Centra i Topčidera uvode se posebnim kolosecima u stanicu (Slika 8.10).



Slika 8.10 Šema izolovanih odseka rasputnice „G“ za Alternativu II

Kod Alternative III uklonjene su skretnice na oba koloseka ka Rakovici i ponuđeno je rešenje gde se u stanicu Rakovica uvode četiri koloseka čime su omogućeni nezavisni putevi vožnje za sve pravce (Slika 8.11).



Slika 8.11 Šema izolovanih odseka rasputnice „G“ za Alternativu III

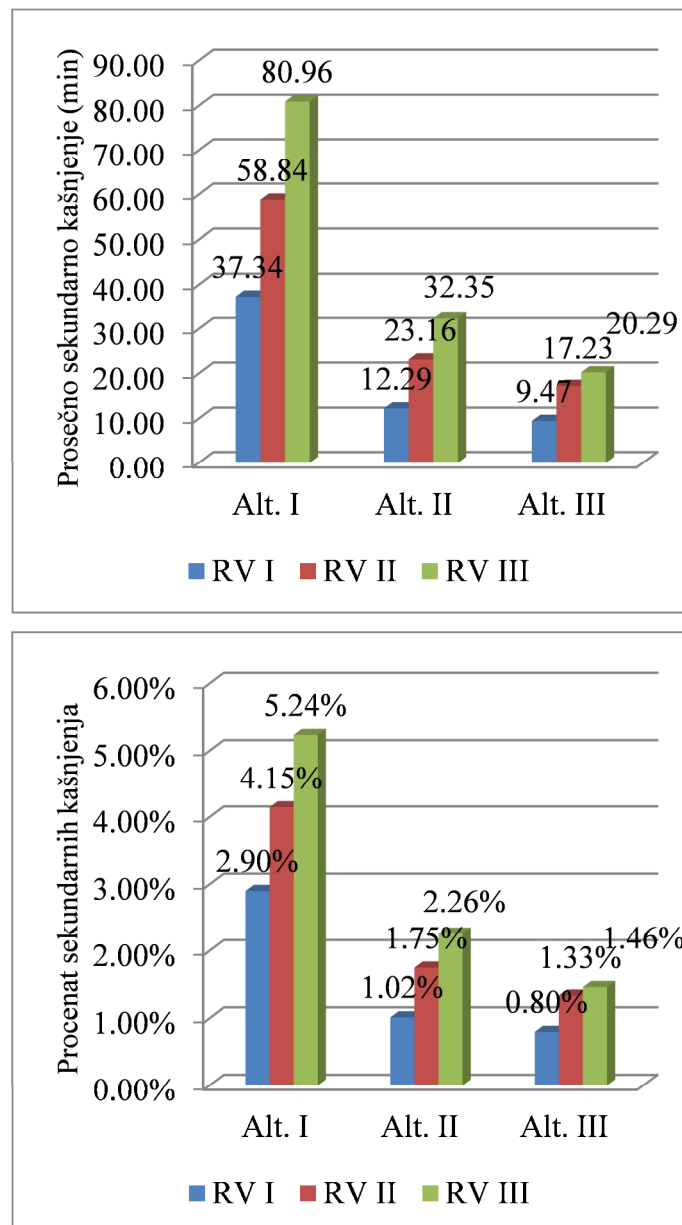
Ulazni podaci u simulacione modele definisani su na osnovu plana odseka rasputnice, i podataka o dužini odseka lokaciji signala. Pri definisanju ulaznih podataka o redu vožnje voza nisu mogli da se koriste postojeći podaci reda vožnje jer je trenutni

broj vozova veoma mali. Pretpostavka je da će se u narednom periodu povećati broj vozova u beogradskom železničkom čvoru. To se prvenstveno odnosi na broj prigradskih i gradskih vozova. Za potrebe simulacije napravljen je prognozirani budući red vožnje. Zbog neizvesnosti budućih tokova putnika i robe napravljene su tri varijante reda vožnje (Tabela 8.1): pesimističan (Red vožnje I), realan (Red vožnje II) i optimističan red vožnje (Red vožnje III). Osnova za izradu prognoze reda vožnje je red vožnje za 2012. godinu i procena povećanja broja prigradskih i teretnih vozova uz dodatak primarnih kašnjenja. Primarna kašnjenja su definisana eksponencijalnom raspodelom (nakon statističke analize kašnjenja u sistemu) za procenjene buduće uslove (Milinković et al., 2012b). Teretni vozovi ne saobraćaju po redu vožnje već je njihovo generisanje u modelu definisano eksponencijalnom raspodelom (objašnjeno u Poglavlju 8.2). Prognozirani redovi vožnje razlikuju se po proceni broja teretnih vozova. S obzirom da se nailasci teretnih vozova ponašaju po stohastičkom modelu, od broja teretnih vozova zavisiće i prostiranje sekundarnih kašnjenja u modelu. Red vožnje putničkih vozova definisan je tako da ne postoje konflikti i čekanja uzrokovani putničkim vozovima.

Tabela 8.1 Prognozirani broj vozova u redu vožnje za simulacioni period (10 dana)

		Rakovica - Beograd Centar	Rakovica-Topčider	Rakovica - Karadorđev Park	Topčider - Rakovica	Beograd Centar - Rakovica	Karadorđev Park - Rakovica	UKUPNO	
Pesimistički red vožnje	Prigradski	242	116	168	210	420	290	1446	1980
	Teretni	-	90	-	108	-	-	198	
	Putnički	47	79	-	120	90	-	336	
Realni red vožnje	Prigradski	242	116	168	210	420	290	1446	2201
	Teretni	-	203	-	216	-	-	419	
	Putnički	47	79	-	120	90	-	336	
Optimistički red vožnje	Prigradski	242	116	168	210	420	290	1446	2411
	Teretni	-	325	-	304	-	-	629	
	Putnički	47	79	-	120	90	-	336	

Simulacije sistema rasputnice vršene su za period od deset dana za tri različita prognozirana reda vožnje vozova. Rezultati dobijeni simulacijom pokazuju da su u Alternativi I uska grla signali koji štite rasputnicu (izlazni signali iz stanice Rakovica i zaštitni signali iz smera Beograda). Alternative su upoređene po sekundarnom kašnjenju nastalom u modelu.



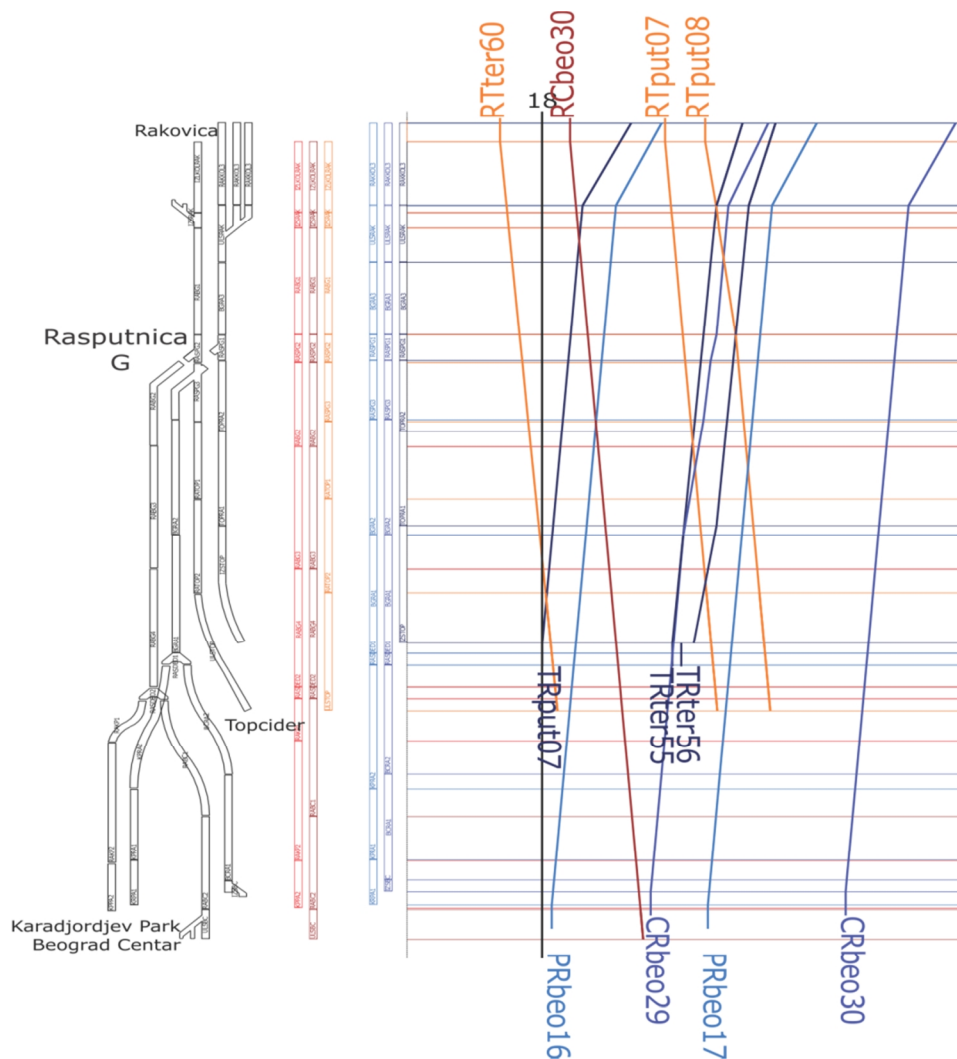
Slika 8.12 Sekundarna kašnjenja u modelu rasputnice

U Tabeli 8.2 upoređena su ukupna vremena zauzetosti odseka za različite alternative za prognozirani optimistički red vožnje (RV III). Rezultati pokazuju (Slika 8.12 i Tabela 8.2) da postoji značajna razlika u sekundarnim kašnjenjima između Alternative I i Alternativa II i III, kao i da Alternative II i III imaju slične rezultate.

Tabela 8.2 Ukupno vreme zauzetosti odseka za period od 10 dana (u satima)

		Rakovica - Beograd Centar	Rakovica-Topčider	Rakovica - Karadorđev Park	Topčider - Rakovica	Beograd Centar - Rakovica	Karadorđev Park - Rakovica	TOTAL		
Alternativa I	Prigradski	32.9	10.7	21.3	16.3	50.2	35.2	167	258	
	Teretni	-	31.3	-	26.2	-	-	58		
	Putnički	6.5	7.0	-	9.2	10.6	-	33		
Alternativa II	Prigradski	32.7	9.1	21.1	14.9	46.7	32.6	157	239	
	Teretni	0.0	26.6	-	24.0	-	-	51		
	Putnički	6.6	6.0	-	8.5	9.9	-	31		
Alternativa III	Prigradski	30.8	8.1	19.9	14.9	46.7	32.6	153	231	
	Teretni	-	24.5	-	24.0	0.0	-	48		
	Putnički	6.0	5.5	-	8.5	9.9	-	30		

Za detaljniju analizu sekundarnih kašnjenja, ali i za verifikaciju modela korišćen je grafički prikaz rezultata preko stvarnog grafikona kretanja vozova (Slika 8.13). Na Slici 8.13 vidi se da kretanje voza CRbeo29 (iz smera Beograda ka Rakovici) izaziva kašnjenje voza TRter55 (koji preko rasputnice G ide iz smera Topčidera ka Rakovici). Kašnjenje voza TRter55, dalje, izaziva kašnjenje uzastopnog voza TRter56. Posmatrajući suprotni smer, vidimo da je kretanje voza CRbeo29 preko rasputnice izazvalo i kašnjenje voza RTput08 iz Rakovice prema Topčideru.



Slika 8.13 Grafikon kretanja vozova sistema rasputnice

Rezultati simulacija sistema rasputnice pokazuju da dizajn rasputnice ima značajan uticaj na kašnjenja vozova i propusnu moć pruge. Denivelacija rasputnice povećava propusnu moć, ali na dvokolosečnoj pruzi nema velike razlike između potpuno denivelisane i delimično denivelisane rasputnice (kada je denivelisan kolosek kod kretanja vozova „uz jezičak“). Kao što se vidi iz rezultata, usko grlo rasputnice su skretnice koje omogućavaju spajanje koloseka ka stanici. Ako se deniveliše ovaj deo rasputnice, tako da se pruge posebnim kolosecima uvode u stanicu, dolazi do značajnog smanjenja sekundarnih kašnjenja i poremećaja kretanja vozova. Kolosek kojim se vozovi otpremaju iz stanice Rakovica, takođe, može biti denivelisan, ali to ne dovodi do daljeg značajnijeg smanjenja kašnjenja. Razlog za to je, što je izlaz vozova iz stanice definisan intervalom sleđenja vozova koji nije veliki, pa su i konflikti trasa vozova retki.

9 ZAKLJUČAK

Jedan od razloga da se Petrijeve mreže koriste za modeliranje sistema je da se opis modeliranog sistema može koristiti kao specifikacija sistema koji razvijamo ili kao prezentacija sistema koji želimo da razumemo ili predstavimo drugima. Proces kreiranja opisa sistema i izvođenja analize obično omogućava značajno bolje razumevanje modeliranog sistema. Veoma je važna karakteristika Petrijevih mreža da ima grafički prikaz koji je uvek lak za razumevanje, čak i za one koji ne poznaju dobro teoriju Petrijevih mreža. Izlazni rezultati prikazani dijagramima liče na mnoge od grafičkih predstavljanja koje programeri i inženjeri koriste dok razvijaju i analiziraju sistem. Slike stanja, izvršavanja događaja i njihovog toka su osnova u velikom broju sistema, a ovi koncepti predstavljeni su kao mesta, prelazi i veze u Petrijevim mrežama. Takođe, Petrijeve mreže su doživele značajan razvoj i omogućeno je precizno određivanje semantika za definisanje ponašanja mreže sa malim brojem dobro definisanih osnovnih reči. Zasnivaju se na dobro poznatom konceptu koji je poznat u matematici i programiranju, što znači da je prilično lako naučiti kako se koristi. Pri eksperimentisanju sa simulacionim modelom, Petrijeve mreže se veoma lako modifikuju u odnosu na manje promene modeliranog sistema. U toku simulacije, program Petrijevih mreža nudi interaktivnu simulaciju u kojoj se rezultati prikazuju direktno na dijagramu grafa Petrijevih mreža, a postoje i alati kojima su podržani crtanje, animacija i formalna analiza rezultata programa.

Simulacioni model predstavljen grafom Petrijevih mreža urađen je u programu *ExSpect*. Petrijeve mreže mogu da opišu različite vrste sistema, a u ovom radu koriste se za modeliranje sistema sa sledećim osobinama: konkurentni, diskretni, vremenski i deterministički (sa mogućnošću uvođenja stohastičkih procesa). Za modeliranje složenih sistema rasputnice koriste se Petrijeve mreže visokog nivoa sa sledećim dijalektima: P/T mreže, vremenske, obojene, stohastičke.

Model rasputnice urađen u Petrijevoj mreži visokog nivoa (HLPN) je kompleksan jer složeni sistemi rasputnice imaju dosta elemenata, veza i zakonitosti. Pri kreiranju modela rasputnice treba voditi računa ne samo o modeliranju kretanja vozova, nego i o

skupu pravila koji se javljaju u sistemu saobraćaja vozova da bi se obezbedio siguran i bezbedan saobraćaj vozova. Petrijeva mreža je zbog toga vrlo pogodna za modeliranje ovakvih sistema jer su Petrijeve mreže prvobitno bile zamišljene kao alat za analizu konkurentnih sistema. Kasnijim razvojem dodate su još neke komponente, tako da Petrijeve mreže mogu modelirati konkurentne, stohastičke, diskretne sisteme.

Simulacioni model sistema rasputnice zasnovan na teoriji Petrijevih mreža ima sledeće karakteristike:

- teorija Petrijevih mreža koja se koristi za simulaciju sistema rasputnice, dozvoljava izradu simulacionog modela sistema koji je diskretan i stohastički,
- u simulacionom modelu vozovi se predstavljaju kao *tokeni*, a izolovani odseci kao *mesta* u grafu Petrijevih mreža,
- voz je predstavljen *tokenom* što znači da se voz posmatra kao materijalna tačka gde je događaj kada voz uđe u naredni odsek istovremeno i događaj kada voz napušta prethodni (u istom trenutku se zauzima naredni i oslobađaj prethodni odsek),
- model rasputnice predstavljen Petrijevim mrežama urađen je kao skup modula ili podsistema koji predstavljaju odseke po kojima se kreću vozovi. Svaki tip odseka predstavljen je jednim modulom. Povezivanjem modula na osnovu plana odseka sistema rasputnice definiše se simulacioni model sistema rasputnice.
- model rasputnice koristi ulazne podatke definisane u bazi podataka koja je povezana sa programom tako da se izmena ulaznih parametara vrlo lako i brzo obavlja bez promene samog simulacionog programa,
- izlazni podaci koji su dobijeni tokom izvršenja simulacije modela mogu se:
 - izvesti u bazu podataka gde se kasnije lako obrađuju i analiziraju,
 - pregledati u toku samog izvršenja simulacije,
 - koristiti u toku izvršenja simulacije za animaciju.
- u toku izvršenja simulacije moguće je pratiti časovnik simulacije i zaustaviti izvršenje simulacije za unošenje promene stanja sistema zbog potrebe za ispitivanjem i ponašanjem sistema,
- moguće je praćenje i analiza kretanja svakog voza u modelu,
- analiza zauzetosti svakog odseka moguća je u toku simulacije pomoću pokazivača stanja odseka i nakon izvršenja simulacije preko analize izlaznih podataka,

- izlaznim podacima prati se kretanje svakog voza kroz model, gde su zabeležena sva vremena ulaza i izlaza vozova za sve odseke,
- tokom izvršenja simulacije pokazivači stanja odseka se koriste za animaciju zauzetosti odseka vozom,
- u model se mogu uvesti stohastički procesi preko raspodela verovatnoća definisanih u biblioteci programa.

Model Petrijeve mreže spada u red mikroskopskih i mezoskopskih simulacionih programa. Zbog toga nije pogodan za primenu u analizi velikih složenih saobraćajnih sistema. Primena modela u analizi mreže pruga ili veće deonice pruge zajedno sa stanicama, nije efikasna jer je potrebno dosta vremena za povezivanje grafa Petrijevih mreža.

Hijerarhijski pristup pri kreiranju modela Petrijevih mreža omogućava da se lako eksperimentišu sa modelom. Takođe, analiza različitih ulaznih podataka (prvenstveno redova vožnje vozova) je vrlo jednostavna. Statistička i grafička analiza rezultata simulacionog modela Petrijeve mreže može dati podatke o fizičkoj i ukupnoj zauzetosti odseka, broju vožnji preko odseka, broju prekretanja skretnica, čekanja vozova, stanjima signala itd. Može se zaključiti da su simulacioni modeli zasnovani na teoriji Petrijevih mreža efikasan alat i da je model prikazan u ovom radu dao kvalitetne rezultate koji mogu da pomognu u analizi infrastrukturnog i tehnološkog rešenja rasputnice.

Fazi Petrijeve mreže mogu se koristiti za modeliranje sistema koje karakteriše nepreciznost i neizvesnost. Kašnjenje vozova može se modelirati intuitivno ili preko NN i ANFIS modela pomoću statističkih podataka. Sistemi sa nepoznatim ponašanjem i bez poznatih podataka modeliraju se fazi logičkim sistemima koje definišu eksperti (dispečeri i otpravnici vozova) na osnovu svog znanja i iskustva. Takvi modeli zavise od ekspertskog znanja, od podataka dobijenih iz redova vožnji i karakteristika pruge. U sistemima gde postoje podaci saobraćaju vozova u prethodnom relevantnom periodu, parametri modela FPN definišu se na osnovu obučene NN mreže ili hibridne neuro-fazi ANFIS mreže. Prednost ovog pristupa je da se kašnjenje proračunava za svaki voz, dok se kod statističkih metoda, rezultati za pojedinačne vozove neprecizni. Rezultati statističkih analiza pokazali su da su modeli računarske inteligencije znatno bolji od modela višestruke linearne regresije. Primena metoda računarske inteligencije povećava

vreme potrebno za implementiranje modela, ali omogućava mnogo preciznije podatke za svaki voz u modelu. Testiranjem FPN modela, a zatim i podešavanjem njegovih funkcija pripadnosti za ulazne i izlazne promenljive i podešavanjem baze pravila mogu se definisati modeli fazi Petrijevih mreža koji bi davali dobre i uporedive rezultate sa stvarnim podacima kašnjenja.

Predloženi modeli testirani su na primeru rasputnice „G“ u beogradskom železničkom čvoru. Testiranje modela izvršeno je na dva načina. U prvom slučaju, testiran je simulacioni model Petrijevih mreža čiji bi se rezultati koristili u operativnom upravljanju. Model koristi predloženi NN model kašnjenja vozova za definisanje ulaznih podataka o primarnom kašnjenju vozova. Rezultati simulacionog modela ukazuju na kvalitet reda vožnje vozova, proračunavaju nastala sekundarna kašnjenja i zauzetost odseka u sistemu rasputnice. U drugom slučaju, simulacioni model Petrijevih mreža upotrebljen je za poređenje tri različita infrastrukturna rešenja rasputnice „G“. Varijante su poređene za različite prognoziranje redove vožnji vozova na rasputnici. Rezultati ovakvog pristupa korišćenju simulacionog modela mogu se koristiti kod strateških odluka o tehničkim, tehnološkim i organizacionim izmenama delova složenih sistema rasputnica.

Simulacioni modeli zasnovani na teoriji Petrijevih mreža su efikasan alat, a predstavljeni model dao je kvalitetne rezultate koji mogu da pomognu u analizi infrastrukturnog i tehnološkog rešenja rasputnice.

Program koji je korišćen za izradu modela, *ExSpect* nije više u fazi aktivnog usavršavanja i često nema dobru saradnju sa programima u okruženju kod novijih operativnih sistema. Međutim, postoje novi programi koji se stalno usavršavaju, tako da je razvijanje modela na njima pojednostavljeno.

Dalja istraživanja mogu se usmeriti u nekoliko pravaca u zavisnosti od oblasti primene predloženih modela. Prvo, potrebna su dalja istraživanja o primeni i adaptaciji predloženog modela u multiagentnom simulacionom modeliranju složenih železničkih sistema. Takvi modeli mogli bi dati dobre rezultate u simulaciji kombinovanih terminala, kompleksnih železničkih stanica, za simulaciju tokova putnika i robe u mreži itd. Drugi pravac istraživanja mogao bi biti usmeren ka unapređenju modela Petrijevih mreža za primenu metoda računarske inteligencije. U okviru ovih istraživanja, bilo bi interesantno raditi na testiranju i unapređenju primene modela kašnjenja vozova, ali i na

modelu (modulu) rešavanja konflikta vozova u simulaciji saobraćaja vozova. Sledeći pravac daljih istraživanja obuhvata primenu novih softvera i dijalekata Petrijevih mreža u simulaciji saobraćaja vozova. Na primer, primena intervalnih i fazi intervalnih vremenskih Petrijevih mreža u simulaciji kretanja vozova.

Kao relativno nova oblast koja se ubrzano razvija, ali i prilagođava za naučnu i istraživačku upotrebu, teorija Petrijevih mreža nudi mogućnost široke primene u analizi i simulaciji složenih sistema i procesa u saobraćaju i transportu.

10 LITERATURA

- Aalst, W. M. P. v. d. (1999). *ExSpect – User Manual*, Deloitte&Touche Bakkeniste, <http://www.exspect.com/ex641usermanual.pdf>.
- Anderson, J. A. (2005). *Diskretna matematika sa kombinatorikom*, CET, Beograd.
- Barber, F.,Abril, M.,Salido, M. A.,Ingolotti, L.,Tormos, P.,Lova, A. 2007. Survey of automated Systems for Railway Management . *Technical Report DSIC-II/01/07*. Technical University of Valencia.
- Basten, T.,Bol, R.,Voorhoeve, M. (1995.) Simulating and Analyzing Railway Interlockings in ExSpect. *IEEE Parallel Distrib. Technol.*, 3, 50-62.
- Bugarín, A.,Cariñena, P.,Barro, S. (1999). Techniques and Applications of Fuzzy Systems Based on the Petri-Net Formalism. *In: Cornelius, T. L. (ed.) Fuzzy Theory Systems*. San Diego: Academic Press.
- Burkolter, D. M. (2005). *Capacity of Railways in Station Areas using Petri Nets*. Doctor of Sciences Thesis, Institute Of Technology Zurich.
- Carey, M.,Kwieceński, A. (1995.) Properties of expected costs and performance measures in stochastic models of scheduled transport. *European Journal of Operational Research*, 83, 182-199.
- Cheng, Y.-H.,Yang, L.-A. (2009.) A Fuzzy Petri Nets approach for railway traffic control in case of abnormality: Evidence from Taiwan railway system. *Expert Systems with Applications*, 36, 8040-8048.
- Čičak, M. (2003). *Modeliranje u železničkom saobraćaju*, Saobraćajni fakultet, Beograd.
- Čičak, M.,Vesković, S. (2005). *Organizacija železničkog saobraćaja*, Saobraćajni fakultet, Beograd.
- D'Ariano, A.,Pacciarelli, D.,Pranzo, M. (2008.) Assessment of flexible timetables in real-time traffic management of a railway bottleneck. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16, 232-245.
- Daamen, W.,Goverde, R. M. P.,Hansen, I. (2009.) Non-Discriminatory Automatic Registration of Knock-On Train Delays. *Networks and Spatial Economics*, 9, 47-61.
- Dündar, S.,Şahin, İ. (2013.) Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 27, 1-15.
- Fanti, M. P.,Giua, A.,Seatzu, C. (2006.) Monitor design for colored Petri nets: An application to deadlock prevention in railway networks. *Control Engineering Practice*, 14, 1231-1247.
- Fay, A. (2000.) A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13, 719-729.

- Garg, M. L., Ahson, S. I., Gupta, P. V. (1991.) A Fuzzy Petri Net for knowledge representation and reasoning. *Information Processing Letters*, 39, 165-171.
- Gerogiannis, V. C., Kameas, A. D., Pintelas, P. E. (1998.) Comparative study and categorization of high-level petri nets. *Journal of Systems and Software*, 43, 133-160.
- Goverde, R. M. P. (2005). *Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis*. PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Goverde, R. M. P. (2010.) A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18, 269-287.
- Hansen, I. A., Pachl, J. (2008). *Railway Timetable & Traffic: Analysis - Modelling - Simulation*, Eurailpress.
- Hansen, I. A. G., R.M.P. van der Meer, D.J. (2010). Online train delay recognition and running time prediction. *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2010 19-22 Sept. 2010
- Herdamm, U. (1996). *Untersuchung der Verspätungsentwicklung von Fernreisezügen auf der Datengrundlage der rechnerunterstützten Zugüberwachung am Frankfurt am Main*. Doctoral Thesis, Technische Hochschule Darmstadt.
- Higgins, A., Kozan, E. (1998.) Modeling Train Delays in Urban Networks. *Transportation Science*, 32, 346-357.
- Hrúz, B., Zhou, M. (2007). *Timed and High-level Petri Nets Modeling and Control of Discrete-event Dynamic Systems*. Springer London.
- Jang, J.-S. R. (1993.) ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23, 665-685.
- Jensen, K. (1991). Coloured petri nets: A high level language for system design and analysis. In: Rozenberg, G. (ed.) *Advances in Petri Nets 1990*. Springer Berlin / Heidelberg.
- Kaakai, F., Hayat, S., El Moudni, A. (2007.) A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transit stations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15, 935-969.
- Karlaftis, M. G., Vlahogianni, E. I. (2011.) Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19, 387-399.
- Kluge, O. (2003). Modelling a Railway Crossing with Message Sequence Charts and Petri Nets Petri Net Technology for Communication-Based Systems. In: Ehrig, H., Reisig, W., Rozenberg, G. & Weber, H. (eds.). Springer Berlin / Heidelberg.
- Konar, A. (2005). Reasoning in Expert Systems Using Fuzzy Petri Nets Computational Intelligence. Springer Berlin Heidelberg.
- Kornakov, A. M. (1962). *Развязки железнодорожных линий в узлах*, Moskva.
- Landex, A. (2008). *Methods to estimate railway capacity and passenger delays*. PhD Thesis, Technical University of Denmark.
- Li-Min, J., Xi-Di, Z. (1994.) Distributed intelligent railway traffic control based on fuzzy decisionmaking. *Fuzzy Sets and Systems*, 62, 255-265.
- Looney, C. G. (1988.) Fuzzy Petri nets for rule-based decisionmaking. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 18, 178-183.
- Looney, C. G. (1994). Fuzzy Petri Nets and Applications Fuzzy Reasoning in Information, Decision and Control Systems. Springer Netherlands.

- Marković, M., Vesković, S., Mladenović, S. (2000). Prognoziranje nekih pokazatelja rada rasputnice metodom simulacije. *SIM-OP-IS 2000*, 10-13.10.2000 Beograd.
- Maroti, G. (2006). *Operations Research Models for Railway Rolling Stock Planning*. PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Mattsson, L.-G. (2007). Railway Capacity and Train Delay Relationships *In: Murray, A. T. & Grubescic, T. H. (eds.) Critical Infrastructure*. Springer Berlin Heidelberg.
- Milinković, S. (2007). *Modeliranje saobraćajnih procesa u složenim sistemima sa rasputnicom*. Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- Milinković, S., Ivić, M., Vesković, S., Marković, M., Pavlović, N. (2012a). Simulation Analysis of the Railway Junction Track Layout. *EURO-ŽEL 2012*, 05 - 06.06.2012. Žilina, Slovak Republic.
- Milinković, S., Marković, M., Vesković, S., Ivić, M., Pavlović, N. (2013.) A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modelling Practice and Theory*.
- Milinković, S., Vesković, S., Marković, M. (2012b). Application of Soft Computing Techniques in Modeling Train Delays. *TRB 91th Annual Meeting*, Washington, DC, USA.
- Milinković, S., Vesković, S., Marković, M., Ivić, M., Pavlović, N. (2010). Simulation model of a railway junction based on Petri Nets and fuzzy logic. *Selected Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society*, 11-15 July Lisbon, Portugal.
- Murata, T. (1989.) Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77, 541-580.
- Nakanishi, H., Turksen, I. B., Sugeno, M. (1993.) A review and comparison of six reasoning methods. *Fuzzy Sets and Systems*, 57, 257-294.
- Pachl, J. (2009). *Railway operation and control*, VTD Rail Pub.
- Palit, A., Popovic, D. (2005). *Computational Intelligence in Time Series Forecasting: Theory and Engineering Applications (Advances in Industrial Control)*, Springer.
- Pedrycz, W., Camargo, H. (2003.) Fuzzy timed Petri nets. *Fuzzy Sets and Systems*, 140, 301-330.
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Bonn, Institut für Instrumentelle Mathematik.
- Preston, J., Wall, G., Batley, R., Ibáñez, J., Shires, J. (2009.) Impact of Delays on Passenger Train Services. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2117, 14-23.
- Příbyl, O., Goulias, K. (2003.) Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System to Analysis of Travel Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1854, 180-188.
- Radenković, B., Stanojević, M., Marković, A. (1999). *"Računarska simulacija", Fakultet organizacionih nauka i Saobraćajni fakultet, Beograd*.
- Ricci, S., Tieri, A. (2008). A Petri Nets Based Decision Support Tool for Railway Traffic Conflicts Forecasting and Resolution. *COMPRAIL'08*, 15-17. September Toledo, Spain, .
- Sazi Murat, Y. (2006.) Comparison of fuzzy logic and artificial neural networks approaches in vehicle delay modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14, 316-334.

- Schwanhäuber, W. (1974). *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*. PhD thesis, Veröffentlichungen des verkehrswissenschaftlichen Instituts RWTH Aachen.
- Sivanandam, S. N., Sumathi, S., Deepa, S. N. (2007). *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*, Springer.
- Teodorovic, D. (1999.) Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33, 337-364.
- Teodorović, D., Šelmić, M. (2012). *Računarska inteligencija u saobraćaju*, Beograd,, Saobraćajni fakultet.
- Teodorović, D., Vukadinović, K. (1998). *Traffic Control and Transport Planning: A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach*, Boston/Dordrecht/London, Kluwer Academic Publishers.
- van der Aalst, W. M. P., Odijk, M. A. (1995.) Analysis of railway stations by means of interval timed coloured Petri nets. *Real-Time Systems*, 9, 241-263.
- van Hee, K., Rambags, P., Verkoulen, P. (1993). Specification and simulation with ExSpect. In: Lauer, P. (ed.) *Functional Programming, Concurrency, Simulation and Automated Reasoning*. Springer Berlin / Heidelberg.
- Vanit-Anunchai, S. (2010). Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets Coordination Models and Languages. In: Clarke, D. & Agha, G. (eds.). Springer Berlin / Heidelberg.
- Vernez, D., Buchs, D., Pierrehumbert, G. (2003.) Perspectives in the use of coloured Petri nets for risk analysis and accident modelling. *Safety Science*, 41, 445-463.
- Virtanen, H. E. (1995.) A study in fuzzy Petri nets and the relationship to fuzzy logic programming. *Reports on Computer Science and Mathematics*.
- Vukadinovic, K., Teodorovic, D., Pavkovic, G. (1999.) An application of neurofuzzy modeling: The vehicle assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 114, 474-488.
- Wang, J. (2007). Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling. *Handbook of Dynamic System Modeling*. Chapman and Hall/CRC.
- Wendler, E., Naehrig, M. (2003.) Statistische Auswertung von Verspätungsdaten *Eisenbahn-Ingenieur-Kalender*, 321-331.
- Yuan, J. (2006). *Stochastic modelling of train delays and delay propagation in stations*. PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Yuan, J., Hansen, I. A. (2007.) Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 202-217.

PRILOG

PRILOG I - Postupci za verifikaciju i validaciju simulacionog modela

U postupku **verifikacije** ne postoji standardizovano pravilo, pa je najčešće potrebno izvršiti više različitih provera:

- ručna verifikacija logičke ispravnosti: model se izvesno vreme propušta na računaru i ručno, a potom porede dobijeni rezultati.
- modularno testiranje: pojedinačno testiranje svakog modula kako bi se ustanovilo da li daje razumne izlaze za sve moguće ulaze.
- provera u odnosu na poznata rešenja: podesimo model tako da predstavlja sistem čija su rešenja poznata i upoređujemo ih sa rezultatima modela.
- testiranje osetljivosti: variramo jedan parametar, dok ostali ostaju nepromenjeni i proveravamo da li je ponašanje modela osetljivo na promenu tog parametra.
- testiranje na poremećaje: postavljamo parametre modela na neprirodne vrednosti i proveravamo da li se model ponaša na neshvatljiv način. Na taj način se mogu otkriti greške u programu koje je vrlo teško uočiti na drugi način.
- osim navedenog, mogu se primeniti i neki drugi poznati postupci koji se koriste pri otklanjanju grešaka u računarskim programima.

Da bi se ostvario proces verifikacije simulacionog modela potrebno je da program radi bez grešaka, a to se može ostvariti uz pomoć sledećih tehnika:

- animacija; jedna od najefektivnijih alatki za verifikaciju. Mogućnost vizuelizacije procesa koji se ostvaruju u programu omogućava programeru da se uveri da program funkcioniše. Animacija se može koristiti na različite načine:
 - korišćenje različitih slika za različite vrste entiteta,
 - praćenje entiteta kroz model,
 - promena slika entiteta,
 - prikaz vrednosti globalnih promenljivih ili atributa entiteta,
 - prikaz animacija vrednosti globalnih promenljivih ili atributa entiteta,
 - prikaz statistika različitog nivoa.
- mogućnost upravljanja časovnikom simulacije po događajima; obično časovnik simulacije radi mnogo brže nego u realnom vremenu i zbog toga je teško pratiti tok simulacije odnosno kretanje entiteta kroz model. Časovnik simulacije se može podešavati da radi određenom brzinom ili u određenim vremenskim

jedinicama. Moguće je i birati između opcija da simulacija traje neprekidno od početka do kraja ili da se časovnik zaustavlja na svakom događaju (ulazak ili izlazak entiteta iz nekog objekta) u toku simulacije. Praćenjem procesa događaj po događaj modelar može da verifikuje rad modela.

- kreiranje izlaznih datoteka; izlazne datoteke sadrže podatke koji su se kreirali u toku simulacije. Pregledom ovih podataka i eventualno dodatnom analizom moguće je zaključiti kako radi model.

Validacija je proces koji utvrđuje da li model predstavlja realnost sa određenim stepenom verovatnoće. To znači da model treba razumno da predstavlja stvarni sistem. Postoji veliki broj razloga zbog kojih model neće uvek verno predstavljati sistem. Zbog toga se mora voditi računa o sledećim faktorima:

- *pretpostavke*; često modelar pravi pretpostavke o modelu koje mogu da se jave iz nedostatka znanja. Ovo se često dešava kada programer pokušava da modelira sistem koji ne postoji ili ima procese koji se ne mogu sagledati. Pretpostavke se mogu donositi u vezi sa delovima sistema, interakcijama u sistemu ili o ulaznim podacima. Čak i kada ima ulazne podatke programer može da pravi pretpostavke da li su podaci validni.
- *pojednostavljenja*; programer može namerno praviti pojednostavljenja u modelu sistema. Neka od ovih pojednostavljenja su potrebna da bi se proces modeliranja sistema završio u određenom roku, a neka jer su procesi i način rada sistema ili previše kompleksni ili beznačajni za model sistema.
- *previdi*; previdi se često mogu napraviti kada je sistem koji se modelira jako složen. Oni utiču na model u velikoj meri, samim tim što programer nije svestan postojanja greške u modelu.
- *ograničenja*; da bi se neki složeni sistemi mogli modelirati potrebno je definisati i neka ograničenja. Važno je da programer bude svestan prirode ograničenja koje nameće tako da model u svojoj suštini i dalje validno predstavlja sistem. Uz izveštaje o simulacionom modelu uvek bi trebalo prilagati i listu primenjenih ograničenja. Ograničenja mogu biti nametnuta od strane programera (modelara), softvera kojim se izvodi modeliranje i od ulaznih podataka.

Postoje dve vrste validacije koje se primenjuju u simulacionom modeliranju. Prva je validacija po izgledu (*face validity*) kada se model bar po izgledu poredi sa izgledom stvarnog sistema. Drugi je statistička validnost gde se kvantitativno porede izlazni rezultati dobijeni u modelu sa performansama sistema.

PRILOG II - Istorijski razvoj Petrijevih mreža

Osnove teorije Petrijevih mreža predstavio je Carl Adam Petri u svojoj doktorskoj disertaciji `Kommunikation mit Automaten` 1962 godine (*Petri, 1962*). Prve mreže nazvane su mreže uslova i događaja (Condition/Event Nets – CE-Nets). U ovom mrežnom modelu svako *mesto* moglo je da sadrži najviše jedan *token*. *Mesto* je predstavljeno logičkim uslovom koji može da bude *true* ili *false*. U narednom periodu veliki broj ljudi je doprineo razvoju novih mrežnih modela, osnovnih koncepata i analitičkih metoda. Jedan od najznačajnijih rezultata bio je razvoj Place/Transition Nets (PT-nets; mreže *mesta* i *prelaza*) koje su dozvoljavale da *mesto* sadrži nekoliko tokena. Kasnije je predložen novi mrežni model koji je nazvan Elementary Nets (EN-nets). Osnovna ideja ovog mrežnog modela slična je onoj kod CE mreža, ali su ove mreže rešile neke od tehničkih problema koji su postojali u osnovnoj definiciji CE mreža. U praktičnoj primeni koristile su se PT mreže, ali često su ti modeli bili previše opšti da bi na prihvatljiv način mogli da opišu stvarne sisteme. Istraživači su proširivali mogućnosti PT mreža dodajući im koncepte kao što su prioriteti između prelaza, vremensko zadržavanje, opšte promenljive koje se testiraju i ponovo definišu prilikom prelaza, početna testiranja mesta i td. Većina ovih modela razvijana je za određenu oblast primene, što je stvorilo probleme pri analizi rezultata modela koji nisu iz oblasti za koju je taj mrežni model kreiran. Pomak u rešavanju ovog problema desio se pojavom Predicate Transition Nets (Pr/T Nets). PrT mreže su prve koje su bile napravljene za opštu primenu, ali imale su neke tehničke probleme kada su nepromenljiva mesta i prelazi generalizovani. Sledeći korak u razvoju Petrijevih mreža bio je pojava obojenih Petrijevih mreža (Coloured Petri Nets – CP-Nets). Glavna ideja ovih mrežnih modela proizašla je iz PrT mreža, stim da je odnos između povezanih elemenata i vrednosti tokena sada definisan preko funkcija, a ne preko izraza kao u PrT mrežama. Postoji jaka veza između PrT i CP mreža i od početka je bilo jasno da opisi jedne mreže mogu biti neformalno prevedeni na drugi mrežni model. Ovo je dovelo do definisanja novog mrežnog modela koji kombinuje kvalitete PrT i CP mreža i nazvan je High-Level Petri Nets HL-nets. Danas se u većini praktičnih primena Petrijevih mreža koriste ili PrT ili CP mreže. Postoji veoma mala razlika između PrT i CP mreža. Glavna razlika između ova dva mrežna modela nalazi se sakrivena unutar metoda za proračun i

tumačenje mesta i prelaza i zato većina autora predlaže da se PrT i CP mreže ne posmatraju kao dva različita jezika za modeliranje nego kao dva slična dijalekta istog jezika.

U odnosu na svoju osnovnu postavku datu u doktoratu Karl Adam Petrija, Petrijeve mreže su značajno evoluirale. Posebno je karakteristično da se za različite primene definišu proširenja Petrijevih mreža. Obično se ovakva proširenja zovu dijalekti, vrste ili tipovi Petrijevih mreža. Ovde je najčešće korišćena definicija Petrijevih mreža i za ovako definisane Petrijeve mreže se koristi naziv standardne ili obične Petrijeve mreže. Petrijeve mreže definisane na taj način u literaturi su poznate i pod nazivom P/T mreže.

PRILOG III – Rečnik pojmova Petrijevih mreža

<u>POJAM</u>	<u>PREVOD</u>	<u>OPIS</u>
Arc	grana	usmerena grana mreže koja može da povezuje mesto i prelaz ili prelaz i mesto. Predstavlja se sa strelicom.
Input Arc (of a transition)	ulazna grana prelaza	grana usmerena sa mesta na prelaz
Output Arc (of a transition)	izlazna grana prelaza	grana usmerena sa prelaza na mesto (čvor)
Arc annotation	obeležje grane	izraz koji može sadržati konstante, promenljive i oznake i koristi se da označi granu u mreži.
Assignment	dodeljivanje	za skup promenljivih, dodeljena vrednost (odgovarajućeg tipa) svakoj promenljivoj
Basis set	osnovni skup	skup objekata koji se koristi za kreiranje multiskupa
Concurrency	konkurentnost	svojsvo sistema u kom događaji mogu da se ostvaruju nezavisno jedni od drugih
Declaration	deklaracija	skup tvrdnji koje definišu skup, konstante, vrednosti parametara i funkcija potrebnih za definisanje opisa Petrijevih mreža
Enabling (of a transition)	okidanje, paljenje, omogućavanje prelaza	prelaz je omogućen u određenoj situaciji i poziciji mreže kada je ispunjen sledeći uslov: <ul style="list-style-type: none"> • označavanje svakog ulaznog mesta za prelaz zadovoljava potražnju koju definiše oznaka grane prelaza za taj određeni slučaj prelaza. Potražnja je zadovoljena kada mesto (čvor) sadrži (najmanje) multiskup tokena koji je naznačen u obeležju grane na kojoj se vrši prelaz.
Concurrent Enabling (of transition modes)	omogućavanje konkurencije u stanju prelaza	skup stanja prelaza je konkurentno omogućen ako sva posmatrana ulazna mesta sadrže dovoljno tokena da zadovolje ukupnu potražnju koju im nameću obeležja grana za svako od mogućih prelaza u skupu prelaza za taj slučaj
High-level Net (High-level Petri Net)	Petrijeve mreže visokog nivoa	sastoje se od: skupa mesta(čvorova); skupa prelaza; skupa tipova; funkcija dodeljivanja tipa svakom mestu i skupa tipova za svaki prelaz; <i>Pre</i> funkcija definiše potražnju za tokenima u mestima za svaki prelaz; <i>Post</i> funkcija određuje izlaz tokena prema mestu za svaki prelaz; i početno markiranje
High-level Petri Net Graph	mrežni graf Petrijeve mreže	mrežni graf sa svojim obeležjima
Marking (of a net)	obeležavanje(markiranje) mreže	skup obeležja mesta za sva mesta u mreži
Initial Marking (of the net)	početno obeležavanje(markiranje) mreže	skup početnih obeležja mesta
Initial Marking of a place	početno obeležavanje (markiranje) mesta	određeno označavanje mesta
Marking of a place	obeležavanje(markiranje) mesta	skup tokena dodeljen mestu (token se nalazi u mestu)
Reachable Marking	dostupno označavanje(stanje)	svako označavanje mreže koje može da bude ostvareno iz početnog označavanja mreže nakon niza prelaza

<i>POJAM</i>	<i>PREVOD</i>	<i>OPIS</i>
Reachability Set	ostvarljiv skup	skup ostvarljivih označavanja mreže, uključujući i inicijalno označavanje
Multiset	multiskup	skup objekata u kome je ponavljanje objekata dozvoljeno
Net	mreža	opšti izraz koji se koristi kao opis Petrijevih mreža svih nivoa
Net graph	mrežni graf	usmereni graf koji se sastoji od skupa dve vrste čvorova koji se zovu mesta i prelazi, i njihovih veza preko usmerenih grana, koji se zovu grane tako da samo mesta mogu biti povezana sa prelazom (tranzicijom) i prelazi sa mestom, ali nikad prelaz sa prelazom i mesto sa mestom
Node (of a net)	čvor mreže	čvor mrežnog grafa – može biti mesto ili prelaz
Petri Net	Petrijeva mreža	struktura sa dva skupa, jedan su prelazi a drugi mesta kojima su dodeljene relacije i funkcije; nazvane su po naučniku koji ih je definisao - Carl Adam Petri
Place/Transition Net	mreže mesta/prelaza	Petrijeva mreža koja se sastoji od mrežnog grafa sa pozitivnim celobrojnim vrednostima dodeljenim granama i sa početnom funkcijom označavanja koja dodeljuje prirodan broj prostih tokena (tzv. crnih tačaka) mestima.
Parameter	parametar	simbol koji može biti u određenom opsegu vrednosti koja je definisana u skupu. Trenutna vrednost se prikazuje kao konstanta.
Place	mesto	čvor mreže, koji pripada tipu mesta; obično se predstavlja krugom ili elipsom
Input Place (of a transition)	ulazno mesto prelaza	mesto povezano sa prelazom preko ulazne grane
Output Place (of a transition)	izlazno mesto prelaza	mesto povezano sa prelazom preko izlazne grane
Place Type	tip mesto	neprazan skup jedinica podataka dodeljenih mestu
Token	token, znak, žeton	znak sa svojim podacima koji je dodeljen određenom mestu
Simple Token	prosti token	token bez vrednosti (podataka), koji se obično grafički predstavlja sa crnom tačkom, i koristi se u mrežama mesta/prelaza-P/T
Transition	prelaz, tranzicija	čvor mreže koji pripada vrsti prelaza; predstavlja se pravougaonikom u mrežnom grafu
Transition condition	uslov prelaza	logički izraz (true or false) povezan sa prelazom
Transition occurrence (Transition rule)	uslov prelaza, uslov paljenja, uslov okidanja	ako je prelaz omogućen on će biti i izvršen; Pri dolasku do prelaza dolazi do sledećih posledica: <ul style="list-style-type: none"> • za svako ulazno mesto prelaza: tokeni koji prelaze oduzimaju se sa označavanja ulaznog mesta, • za svako izlazno mesto prelaza: multiskup tokena omogućen za prelaz i odobren od strane obeležja grane prelaza dodaje se markiranju (označavanju) izlaznog mesta
Transition Variables	parametri prelaza	svi parametri koji se pojavljuju u izrazima koji opisuju prelaz. To su uslovi prelaza i obeležja grana koje su povezane sa prelazom.

PRILOG IV- Softverski paketi za primenu Petrijevih mreža

Uparedni prikaz odabranih softverskih programa koji se koriste za modeliranje Petrijevim mrežama.

(izvor: www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools)

Naziv programa	Karakteristike programa	Opis programa
CPN Tools	<p>Vrste Petrijevih mreža koje podržava:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Petrijeve mreže visokog nivoa • vremenske Petrijeve mreže <p>Komponente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • grafički editor • animacija tokena • brza simulacija • jednostavna analiza 	<p>Dostupnost: besplatan program</p> <p>Program koji se dosta primenjuje. Prilagođen je novom standardu Petrijevih mreža visokog nivoa.</p>
ExSpect	<p>Vrste Petrijevih mreža koje podržava:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Petrijeve mreže visokog nivoa • P/T mreže • stohastičke Petrijeve mreže • vremenske Petrijeve mreže • hijerarhija u modeliranju <p>Komponente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • grafički editor • animacija tokena • brza simulacija • jednostavna analiza • kompleksna analiza sistema 	<p>Dostupnost: besplatan program</p> <p>Program koji služi u poslovnom odlučivanju sa mogućnošću modeliranja, monitoringa i analize poslovnih procesa efikasno i jednostavno. Koristi dobar grafički interfejs i veliku bazu gotovih komponenti za brzo modeliranje sistema.</p>
TimeNET	<p>Vrste Petrijevih mreža koje podržava:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Petrijeve mreže visokog nivoa • P/T mreže • stohastičke Petrijeve mreže • vremenske Petrijeve mreže <p>Komponente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • grafički editor • animacija tokena • brza simulacija • jednostavna analiza • kompleksna analiza sistema 	<p>Dostupnost: komercijalni program (besplatan za akademske institucije)</p> <p>Program koji služi za modeliranje stohastičkih Petrijevih mreža. Modeli se kreiraju preko grafičkih interfejsa. Podržava modele sa diskretnim i kontinualnim vremenom. Postoji specijalan modul za kreiranje sistema obojenih Petrijevih mreža.</p>

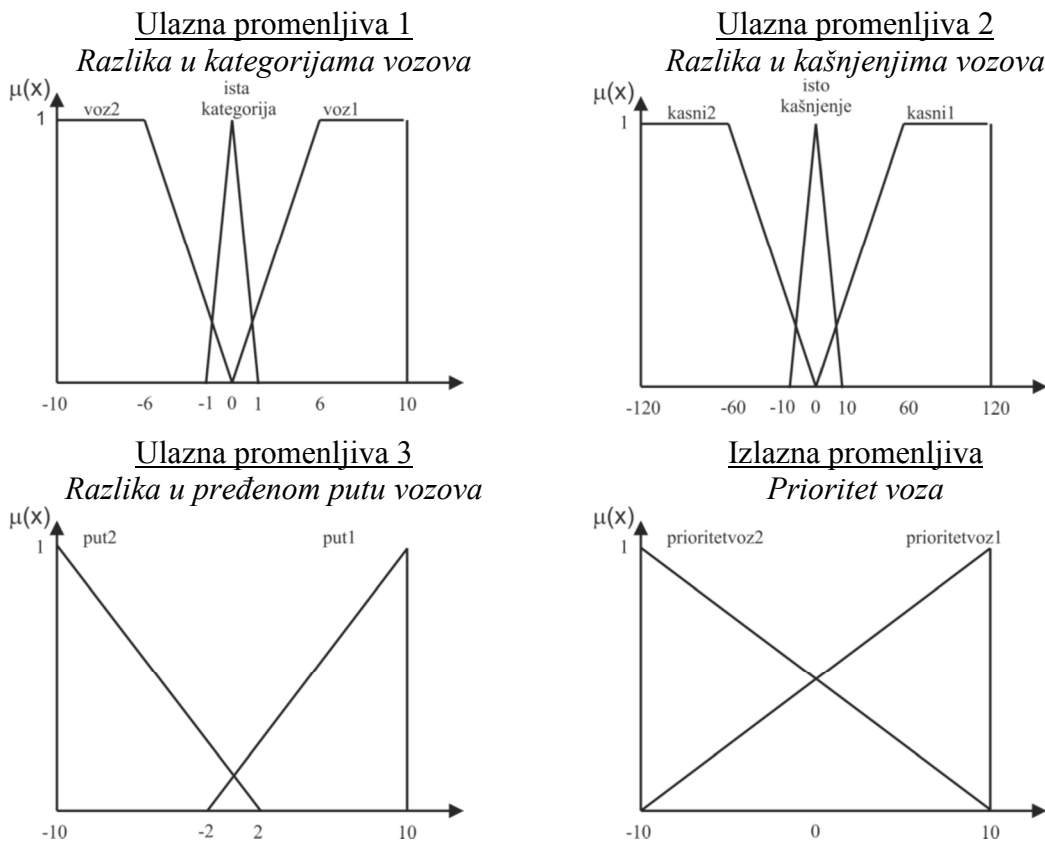
PRILOG V - Modul fazi Petrijeve mreže za rešavanje konflikata

VOZOVA

Modul se koristi za rešavanje eventualnih konflikata vozova na rasputnici ili u nekom službenom mestu gde se putevi vožnji vozova presecaju. Model sistema saobraćaja vozova bez ovog modula zasniva se na principu prioriteta FIFO (*First In – First Out*) koji može donekle da se izmeni logičkim uslovima za kretanje voza. Kada ne postoje primarna kašnjenja putnički vozovi saobraćaju bez nepredviđenog zadržavanja i po prethodno definisanom redu vožnje. Vozovi sa primarnim kašnjenjima i saobraćaj teretnih vozova mogu da izazovu konflikte sa vozovima koji saobraćaju po redu vožnje. Konflikt nastaje kada više vozova zahteva istovremeno korišćenje jednog ili više izolovanih odseka. Posledica je zaustavljanje (ili usporenje) jednog od vozova za onoliko vremena koliko je drugom vozu potrebno da oslobodi izolovane odseke uz dodatno vreme (npr. za usporenje ili ubrzanje). Ukupno vreme zadržavanja zavisiće od pozicije vozova, načina osiguranja, prioriteta vozova i karakteristika pruga i službenih mesta. Konfliktne situacije su jedan od uzroka nastanka sekundarnih kašnjenja gde kašnjenje jednog voza može da se prenese na drugi. Pri rešavanju konfliktnih situacija, dispečeri određuju prioritet vozova na osnovu principa bezbednosti i efikasnosti sistema. Modul fazi Petrijevih mreža pri određivanju prioriteta voza koristi fazi logiku u koju su ugrađeni neki od principa kojima se rukovode i dispečeri pri operativnom odlučivanju. Kao osnova usvojeni su logički principi koje je definisao (*Li-Min i Xi-Di, 1994*). Modul ne može da analizira uticaj kašnjenja na ostale vozove. Koriste se samo podaci koji se nalaze u tokenu, a koji prate svaki voz i dinamički se menjaju kretanjem voza po odsecima modela. Za odluku o prioritetu voza koriste se podaci o kategoriji voza, trenutnom kašnjenju voza i pređenom putu voza. Logika određivanja prioriteta voza definisana je kroz sledeće principe:

- vozovi više kategorije imaju prioritet u odnosu na vozove niže kategorije,
- ako su vozovi iste kategorije, voz sa manjim kašnjenjem ima prednost,
- ako vozovi imaju istu kategoriju i kašnjenje, prioritet ima voz koji je prešao veći deo puta.

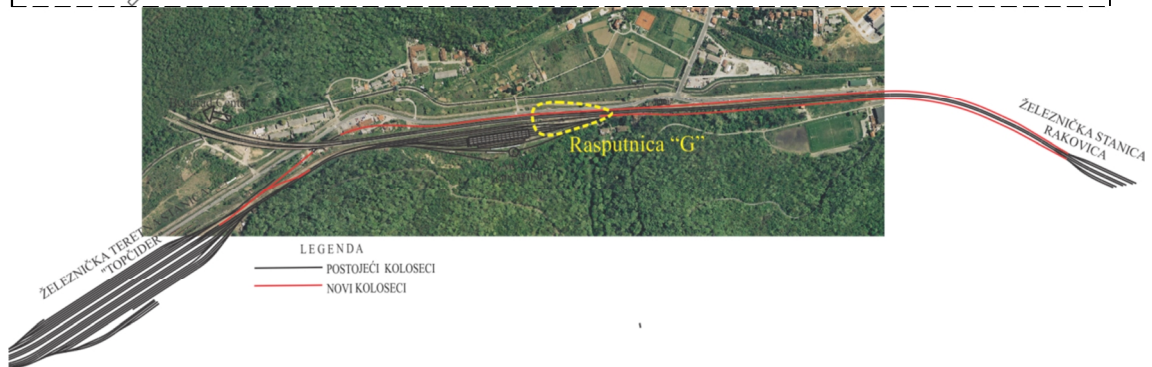
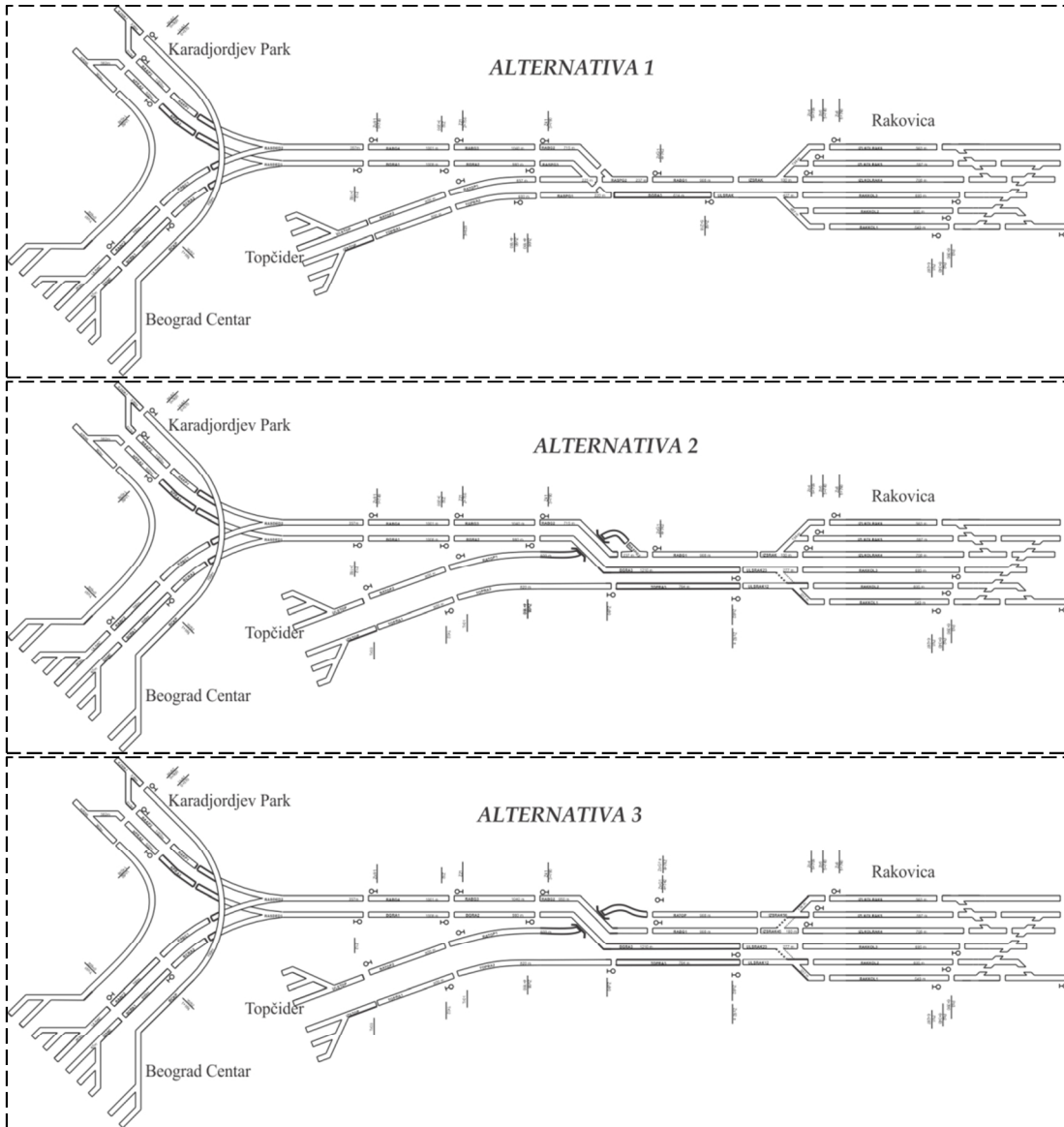
Ova uprošćena pravila ne uključuju sve aspekte kojima se rukovode dispečeri u regulisanju saobraćaja vozova, tj. ne uzima se u obzir kako redosled vozova utiče na ukupno ponašanje sistema i saobraćaj ostalih vozova. U tom smislu, kašnjenja se mogu preneti i na vozove koji čekaju zbog presedanja putnika ili sličnih situacija kada su polasci zavisni od drugih vozova. Takođe, u stvarnim sistemima postoji mogućnost da voz dobije prednost iako ne ispunjava ni jedan od predloženih principa. Primer za to je apsolutni prioritet voza na deonici pruge gde postoji mogućnost da, ako se voz zaustavi, ne može da se ponovo samostalno pokrene (veliki usponi i sl.). Ipak, predloženi principi su primenjivi na veliku većinu situacija i imaju prednosti u odnosu na primenu principa FIFO. Model fazi sistema definisan je sa tri ulazne promenljive: razlika između kategorija vozova, razlika u kašnjenju vozova i razlika u procentu pređenog puta. Izlazna promenljiva je prioritet voza i definisana je sa dva fazi skupa: prioritet prvog voza i prioritet drugog voza. U modelu je korišćen logički AND operator za MIN (pravilo minimuma za AND relacije). Pri kreiranju konsekventnog fazi skupa koristi se MAX-MIN zaključivanje, a defazifikacija se vrši metodom centra gravitacije.



Funkcija pripadnosti fazi skupova ulaznih i izlazne promenljive za model prioriteta vozova

PRILOG VII – ALTERNATIVE DENIVELACIJE RASPUTNICE

„G“



BIOGRAFSKI PODACI O KANDIDATU

Sanjin M. Milinković rođen je 1972. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu školu i srednju školu. Diplomirao je na Saobraćajnom fakultetu 2001. godine na Odseku za železnički saobraćaj i transport sa prosečnom ocenom u toku studija 8,03, gde je odbranio i diplomski rad pod nazivom "Uticaj bezbednosnih parametara na propusnu moć rasputnice 'G' Beogradskog železničkog čvora" sa ocenom 10.

Poslediplomske studije na Univerzitetu u Beogradu - Saobraćajnom fakultetu, smer „Upravljanje razvojem i tehnološkim procesima na železnici“ upisao je 2001. godine. U julu 2003. godine završio je stručnu praksu i položio stručni ispit u ŽTP-u Beograd kao saobraćajni inženjer na radnom mestu vodeći tehnolog-pripravnik u Sekciji za STP Beograd. Magistrirao je 2007. godine na Univerzitetu u Beogradu - Saobraćajnom fakultetu sa temom „Modeliranje saobraćajnih procesa u složenim sistemima sa rasputnicom“. Magistarski rad je dobio godišnju Nagradu Privredne komore Beograda za najbolji magistarski rad.

Zaposlen je na Univerzitetu u Beogradu-Saobraćajnom fakultetu kao asistent i u nastavi je angažovan na izvođenju vežbi na predmetima „Tehnologija železničkog saobraćaja“, „Planiranje i eksploatacija železničkog saobraćaja“, „Primena matematičkih metoda u železničkom saobraćaju“, „Modeliranje u železničkom saobraćaju“ i „Regulisanje upotrebe kola“. Aktivno se služi engleskim jezikom. Član je međunarodnog društva IAROR (*International Association of Railway Operations Research*) i Društva diplomiranih inženjera železničkog saobraćaja. Uže oblasti njegovog naučnog i istraživačkog interesovanja su primena metoda simulacionog modeliranja, računarske inteligencije i operacionih istraživanja, kao i planiranje i vrednovanje projekata u železničkom saobraćaju i transportu.

Objavio je četiri rada u međunarodnim časopisima sa SCI liste, četiri rada u nacionalnim časopisima, kao i 47 radova i saopštenja na domaćim i međunarodnim naučnim skupovima i konferencijama. Kao član autorskog tima učestvovao je u izradi 23 naučno-istraživačkih i stručnih studija i projekata.

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani Sanjin Milinković

broj upisa _____

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

„METODOLOGIJA ZA UTVRĐIVANJE OPTIMALNOG REŠENJA RASPUTNICE“

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 8. 5. 2013. godine



Prilog 2.

Izjava o korišćenju

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Sanjin Milinković

Broj upisa _____

Studijski program _____

Naslov rada „Metodologija za utvrđivanje optimalnog rešenja rasputnice“

Mentor Prof. dr Katarina Vukadinović, dipl.inž.

Potpisani Sanjin Milinković

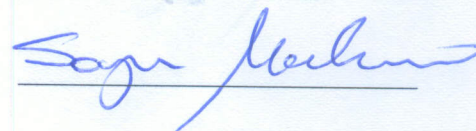
izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 8. 5. 2013. godine



Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

„Metodologija za utvrđivanje optimalnog rešenja rasputnice“

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo

2. Autorstvo - nekomercijalno

3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade

6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranda

U Beogradu, 8. 5. 2013. godine

