

# Vremensko modeliranje željezničkoga prometa u funkciji stabilnosti voznoga reda

---

Duvnjak, Branimir

Doctoral thesis / Disertacija

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:801840>

*Rights / Prava:* [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-05**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Branimir Duvnjak, mag. ing. traff.

**Vremensko modeliranje željezničkoga  
prometa  
u funkciji stabilnosti voznoga reda**

DOKTORSKI RAD

Mentori: prof. dr. sc. Tomislav Josip Mlinarić  
prof. dr. sc. Danko Kezić

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

*FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC SCIENCES*

Branimir Duvnjak, mag. ing. traff.

# **Temporal modeling of the rail transport in the timetable stability function**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors: prof.dr.sc. Tomislav Josip Mlinarić  
prof.dr.sc. Danko Kezić

Zagreb, 2022.

## ZAHVALA

Bila mi je izuzetna čast i zadovoljstvo pisati ovu disertaciju pod mentorstvom prof. dr. sc. Tomislava J. Mlinarića i prof. dr. sc. Danka Kezića. Zahvaljujem im na trudu, strpljivosti i vremenu koje su mi posvetili prilikom njene izrade i istraživanja.

Veliko hvala supruzi Željki na podršci, razumijevanju i bezgraničnoj strpljivosti tijekom ovog vremena koje sam posvetio istraživanju i pisanju disertacije. Hvala mojim kćerima Mariji, Ivani, Aniti i unučici Teni koje su bile razlog i motivacija da ovo putovanje nastavim do kraja.

## SAŽETAK

Organizaciju prijevoza putnika u željezničkom prometu definiraju tehnološka rješenja ovisna o optimizaciji iskorištenja infrastrukture. Izrađeni model temelji se na promjenjivim vremenskim komponentama minimalnog intervala slijeđenja i klasifikaciji vlakova prema vremenskim karakteristikama putovanja, što dovodi do povećanja iskorištenja infrastrukture. Istraživanja optimizacije željezničke mreže i putničkog prometa te taktnog voznog reda temelje se na

prediktivnim metodama i matematičkim alatima za modeliranje i simulaciju sustava. Određivanje

minimalnog intervala slijeđenja te rezervnog i dodatnog vremena spada u optimizaciju iskorištenja

infrastrukture. Optimizacijom navedenih vremena osigurava se stabilnost i kvaliteta voznog reda čime se utječe na razinu usluge i karakteristike prometno-tehničkih i operativnih svojstava mreže.

Za modeliranje putničkog prometa i određivanje granica između pojedinih vrsta putničkog prometa

umjesto fiksne geografske pozicije koriste se definirani vremenski intervali putovanja. Takav pristup obvezuje upravitelja infrastrukture da povećanjem kvalitete infrastrukture omogući veće maksimalne brzine na pruzi. Povećanjem brzine uzročno-posljedično se povećava radijus određenog područja prometa, prije svega gradsko-prigradskog prometa.

Definiranjem tehnoloških postupaka u organizaciji prometa temeljenih na vremenskim komponentama i smjernicama razvoja gradsko-prigradskog prometa povećava se iskorištenje infrastrukture i prijevoznih sredstava te kvaliteta usluge. Za modeliranje i simuliranje prometnog modela temeljenog na vremenskim parametrima koristit će se teorija diskretnih događaja i matematički pristup koji koristi Petrijeve mreže.

**Ključne riječi:** organizacija prometa, taktni vozni red, rezervno vrijeme, Petrijeve mreže

## SUMMARY

The organization of passenger traffic in railway transport is defined by technological solutions dependent on the optimization of infrastructure utilization. The development of a model based on the variable time components of the minimum tracking interval and the classification of trains according to the time characteristics of the journey as a result optimize the utilization of infrastructure. Research on the optimization of the railway network and passenger traffic and the schedule is based on predictive methods and mathematical tools for modeling and simulation of the system. Determining the minimum follow-up interval and reserve and spare time is part of optimizing infrastructure utilization. The optimization of these times ensures the stability and quality of the schedule which affects the level of service and the characteristics of traffic-technical and operational properties of the network.

Travel modeling is used instead of a stable geographical position to model passenger traffic and determine boundaries between separate types of passenger traffic. Such an approach obliges the infrastructure manager to enable a higher maximum speed on the line by increasing the quality of infrastructure. Increasing the speed causally increases the radius of a certain area of traffic, primarily urban-suburban traffic.

Defining technological procedures for the organization of transport based on time components and guidelines for developing urban-suburban transport increases the use of infrastructure and means of transport as well as the quality of service. Discrete event theory and the mathematical approach used by Petri Nets will be used to model and simulate a traffic model based on time parameters.

**Keywords:** Traffic organization, cyclic timetable, buffer time, Petri Net

## Sadržaj:

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Problem istraživanja .....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Cilj i hipoteze istraživanja.....</i>	<i>3</i>
1.3	<i>Znanstveni i aplikativni doprinos .....</i>	<i>4</i>
1.4	<i>Primijenjene znanstvene metode .....</i>	<i>4</i>
1.5	<i>Pregled dosadašnjih istraživanja .....</i>	<i>5</i>
1.6	<i>Struktura doktorske disertacije .....</i>	<i>7</i>
<b>2</b>	<b>Tehnološki kriteriji organizacije prijevoza.....</b>	<b>10</b>
2.1	<i>Organizacija željezničkog prometa.....</i>	<i>10</i>
2.2	<i>Analiza tokova putnika u funkciji organizacije putničkog prometa.....</i>	<i>13</i>
2.3	<i>Utvrđivanje zona gradsko-prigradskog prometa .....</i>	<i>20</i>
2.4	<i>Optimizacija organizacije željezničkog prometa .....</i>	<i>24</i>
<b>3</b>	<b>Tehnološki kriteriji stabilnosti voznog reda .....</b>	<b>33</b>
3.1	<i>Elementi voznog reda .....</i>	<i>33</i>
3.2	<i>Propusnost i kapacitet pruge.....</i>	<i>38</i>
3.3	<i>Prijevozni kapaciteti taktnog voznog reda .....</i>	<i>43</i>
3.4	<i>Poremećaji u prometu i akceleracijska uska grla .....</i>	<i>45</i>
3.5	<i>Prediktivna analiza kašnjenja vlakova na području gradsko-prigradskog prometa</i>	<i>53</i>
3.6	<i>Prediktivna analiza u funkciji predviđanja potrebnih kapaciteta .....</i>	<i>55</i>
<b>4</b>	<b>Upotreba vremenskih parametara u definiranju prometa .....</b>	<b>59</b>
4.1	<i>Izračun intervala slijeđenja.....</i>	<i>59</i>
4.1.1	<i>Rezervno vrijeme .....</i>	<i>64</i>
4.1.2	<i>Minimalni interval slijeđenja vlakova .....</i>	<i>65</i>
4.2	<i>Prijedlog izračuna dodatnog vremena .....</i>	<i>67</i>

<b>5</b>	<b>Simulacijski model</b> .....	<b>72</b>
5.1	<i>Petrijeve mreže</i> .....	73
5.2	<i>Izrada simulacijskog modela</i> .....	76
5.3	<i>Testiranje modela</i> .....	88
5.4	<i>Funkcionalnost simulacijskog modela u dokazivanju optimizacije i stabilnosti voznog reda</i> .....	91
<b>6</b>	<b>Zaključak</b> .....	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>Literatura</b> .....	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>PRILOZI</b> .....	<b>102</b>
8.1	<i>POPIS SLIKA</i> .....	102
8.2	<i>POPIS TABLICA</i> .....	105



## Životopisi mentora

**Prof. dr. sc. Tomislav Josip Mlinarić** rođen je 14. svibnja 1969. u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu, Matematičko-informatički obrazovni centar, završio je u Zagrebu. Diplomirao je na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu 1994. Kao studentu na posljednjoj godini studija rektor mu je dodijelio stipendiju Sveučilišta u Zagrebu. Od 1. listopada 1994. zaposlen je na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, u Zavodu za željeznički promet. Doktorski rad pod naslovom „Dugoročna procjena kvalitete kolosiječne geometrije s ciljem identificiranja zahtjeva održavanja“ obranio je 15. studenoga 2002., stekavši akademski naslov doktora znanosti u području tehničkih znanosti, znanstvenome polju Tehnologija prometa i transporta. Doktorski rad je izrađen i obranjen u sklopu zajedničkog programa Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu i Tehničkog sveučilišta u Grazu i njegovog Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft. Trenutno je na matičnom fakultetu u statusu redovitog profesora u trajnome zvanju na Zavodu za željeznički promet. Obnašao je dužnosti prodekana i dekana Fakulteta prometnih znanosti u dva mandata. Bio je član Vijeća tehničkoga područja Senata, Odbora za znanost i međunarodnu suradnju i voditelj Povjerenstva za inovacije i transfer tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Objavio je više od 80 znanstvenih radova te sudjelovao na više od 50 domaćih i međunarodnih znanstvenih skupova. Od 2004. do 2005. obnašao je dužnost predsjednika Uprave i generalnog direktora Hrvatskih željeznica, a od 2012. do 2017. bio je predsjednik Upravnoga vijeća Agencije za sigurnost željezničkog prometa RH. Od 2019. pročelnik je Sekcije za kopneni promet Znanstvenoga vijeća za promet u Hrvatskoj akademiji znanosti i umjetnosti i izabran je za člana suradnika Akademije tehničkih znanosti Hrvatske u Odjelu prometa. Na Sveučilištu u Zagrebu trenutno obnaša 4-godišnji mandat Prorektora za inovacije, transfer tehnologije i suradnju s gospodarstvom.

**Prof. dr. sc. Danko Kezić** rođen je 1960. godine. Nakon gimnazije je upisao FER te je diplomirao 1982. godine. Nakon toga se zapošljava kao razvojni inženjer sigurnosnih elektroničkih sustava. Godine 2003. brani doktorsku disertaciju na Zavodu za automatiku i procesno računarstvo Fakulteta elektrotehnike i računarstva temom „Sprječavanje potpunog zastoja u sustavima s diskretnim događajima primjenom Petrijevih mreža“.

Od 1995. godine radi na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu. Održava nastavu iz više kolegija iz područja elektrotehnike, računarstva i automatike na Pomorskom fakulteta u Splitu i Dubrovniku. Prof. Kezić ima izbor u dva znanstvena polja iz znanstvenog područja tehničkih znanosti – znanstveni savjetnik u polju elektrotehnika (2011) i znanstveni suradnik u polju tehnologija prometa i transport (2014). Godine 2016. izabran je kao redoviti profesor u trajnom zvanju.

Prof. Kezić je vodio niz doktorata te objavio niz radova u časopisima iz područja modeliranja i simuliranja diskretnih sustava, s posebnim osvrtom na rješavanje problematike konflikata i zastoja pomorskih prometnih sustava primjenom Petrijevih mreža. Profesor Kezić je član Koreme i IEEE-e.

# 1 Uvod

## 1.1 Problem istraživanja

Svaka urbana sredina ima svoje specifičnosti koje onemogućavaju univerzalnu metodu planiranja prometa, a te specifičnosti mogu biti ekonomske, političke, gospodarske ili geografske. Urbanizacija je stalni proces oblikovanja naselja različit u vremenu i položaju u kojima nastaje, a ovisi o korelaciji prometnog i urbanog razvoja [1].

Istraživanju prometne potražnje može se pristupiti kvalitativno i kvantitativno. Kvalitativno proučavanje se oslanja na prosudbeno ili intuitivno znanje stručnjaka iz područja proučavanja prometa bez uzimanja u obzir analiza ostvarenih parametara. Kvantitativno proučavanje utvrđuje, na osnovi pojava i procesa u proteklom razdoblju, moguća kretanja prometne potražnje uzimajući u obzir ovisnosti koje nastaju na određenom području.

U ovom radu će se za područja za koja postoje analitički podaci upotrebljavati kvantitativno proučavanje, dok će se za područja gdje ne postoje pouzdani analitički podaci, postupak oslanjati na analitičko-matematički model s upotrebljivim podacima.

Sve veće zagušenje prometa u aglomeracijskim centrima potaknulo je uvođenje integriranog javnog prijevoza. Zbog toga je potrebna optimizacija iskorištenosti sredstava masovnog javnog prijevoza, naročito modova na specifičnim prometnicama. U tu kategoriju spadaju tramvajski i željeznički promet.

Željeznički promet je dislociran od cestovne infrastrukture što omogućava jednostavniju optimizaciju iskorištenja prijevoznih sredstava i infrastrukture.

Problemi koji se javljaju su: nestabilnost voznog reda koji može biti posljedica nedovoljno kvalitetne optimizacije, neispravnost prijevoznih sredstava i smanjenje kvalitete infrastrukture. U izvanrednim situacijama na stabilnost voznog reda mogu utjecati izvanredni događaji na željezničkim cestovnim prijelazima ili vremenske nepogode.

Da bi se povećala učinkovitost voznog reda, prvenstveno smanjenje utjecaja vlakova koji kasne na redovite vlakove, potrebno je analizirati tehničke i tehnološke komponente sustava te mogućnost njihove optimizacije.

Prediktivna analiza tokova putnika pokazuje trend rasta dnevnih migracija putnika u područjima aglomeracijskih centara. Zbog toga je za dnevne migracije potrebno povećati kapacitete prijevoza uz zadržavanje ili povećanje kvalitete prijevoza u područjima aglomeracijskih centara. U kategoriju kvalitete prijevoza svakako spadaju dostupnost, redovitost i učestalost vlakova.

Tokovi putnika ukazuju da se mijenjaju navike korisnika javnog prijevoza, naročito u tim područjima. Od javnog prijevoza korisnici očekuju pouzdanost, točnost i učestalost uz jedinstveni tarifni sustav svih modova prijevoza uključenih u javni prijevoz. Željeznički prijevoz, kao okosnica javnog prijevoza, u tako organiziranim područjima ima potrebu organizacijskih izmjena kako bi se maksimalno iskoristili njegovi kapaciteti i prednosti. Istraživana dionica predstavlja dionicu koja je najopterećenija na mreži i na kojoj prometuje najveći broj putničkih vlakova različitih kategorija, a analizirana je kao studija slučaja. U 24-satnom razdoblju postoje dva vršna opterećenja prilikom dnevnih migracija: jutarnji vršni sati opterećenja u vremenskom intervalu 05:00 – 09:00 sati prilikom odlaska u aglomeracijsko središte na posao, fakultet, školu ili privatnih obaveza i popodnevni vršni sati opterećenja 15:00 – 19:00 sati prilikom povratka.

Postojećom organizacijom putničkog prigradskog prometa u prijevoz su uključeni vlakovi gradsko-prigradskog prometa i putnički vlakovi regionalnog prometa. Uočeni nedostatci prilikom analize navedene organizacije pokazuju da su putnički vlakovi iz regionalnog prijevoza podložni velikoj vjerojatnosti kašnjenja zbog duljine relacije putovanja pa time narušavaju stabilnost voznog reda. Uz navedeno, takvi vlakovi nemaju potpuno iskoristiv kapacitet jer su im dolaskom u područje gradsko-prigradskog prometa kapaciteti djelomično popunjeni.

Tehnički nedostatak garnitura putničkih vlakova iz regionalnog prometa je neprilagođenost ulaza/izlaza brzom izmjeni putnika. Prema konstrukciji imaju više sjedećih mjesta što zahtijeva veće vremensko bavljenje na stajalištima. Povećano bavljenje vlakova na stajalištima smanjuje komercijalnu brzinu vlakova, a time i kvalitetu prijevozne usluge.

Organizacija prometa na način da su regionalni putnički vlakovi uključeni u gradsko-prigradski promet otežava analizu tokova putnika zbog čega se ne mogu pouzdano odrediti potrebni kapaciteti, dok unapređenje kvalitete prijevoza nije samo nabava novih prijevoznih sredstava.

Dosadašnje izvedbe voznih redova nemaju definiran i implementiran takti vozni red. Takti vozni red osigurava da neke od glavnih karakteristika gradsko-prigradskog prometa, redovitost i stalnost, dođu do izražaja. Ukoliko nema implementiranog taktnog voznog reda, ne postoji mogućnost brzog djelovanja na zahtjeve tokova putnika za kapacitetima prijevoza manipulacijom vremena intervala takta. Manipulacija se odnosi na povećanje ili smanjenje vremena takta i time se povećava ili smanjuje kapacitet prijevoza s obzirom na broj vlakova koji prometuju u određenom vremenskom intervalu. Takvim pristupom se optimizira upotreba voznih sredstava, njihova raspoređenost na mreži te se smanjuju troškovi održavanja.

Relacije u gradsko-prigradskom prometu su najkraće dionice u željezničkom putničkom prometu i ne pružaju mogućnost nadoknade kašnjenja. Rezultati analize kašnjenja gradsko-prigradskih vlakova pokazuju da na kašnjenja zbog poštivanja prednosti vlakova prema rangovima otpada više od 65%. U primarna kašnjenja spadaju ona kašnjenja koja nastaju zbog čekanja na pretjecanje vlakova višeg ranga, a u sekundarna kašnjenja spadaju čekanja u obrtnim kolodvorima na garniture iz obrta. Glavni razlog kašnjenja zbog rangiranja vlakova je taj što vlakovi gradsko-prigradskog prometa imaju najniži rang. Rang vlakova i tehnologija upravljanja prometom regulirani su podzakonskim aktima, pravilnicima i uputama koji nisu podložni prilagodbama novonastalim zahtjevima postavljenim tokovima putnika.

Određivanje zonskog prometa u postojećoj organizaciji temelji se na kilometarskoj udaljenosti od aglomeracijskog centra. Na ovaj način upravitelj infrastrukture nije opterećen obavezom učešća u povećanju kvalitete prijevoza. Analiza ulaganja u održavanje pokazuje da upravitelj infrastrukture ima dugogodišnju praksu kašnjenja s redovitim održavanjem čime je narušena i sama stabilnost voznog reda. Učešće upravitelja infrastrukture u povećanju kvalitete prijevoza postiže se ulaganjem u modernizaciju te u kvalitetna i redovita održavanja. Kvalitetno i redovito održavanje osigurava maksimalne projektirane brzine na pruži koje osiguravaju minimalna vremena vožnji između kolodvora.

Parcijalni pristup rješavanja navedenih nedostataka ne može povećati postojeću kvalitetu željezničkog prometa u gradsko-prigradskom prometu.

Kvalitetna analiza potrebe za kapacitetima sadržava bitnu stavku koja se odnosi na koeficijent popunjenosti koji varira ovisno o dijelu dana. Vremensko razdoblje jednog dana moguće je podijeliti na nekoliko vremenskih intervala s obzirom na koeficijent popunjenosti tako da možemo približno točno proračunati prosječni dnevni kapacitet popunjenosti putničkih garnitura. Proračun se temelji na svakoj referentnoj točki manipulacije s putnicima koja je definirana kao kritična točka na promatranoj relaciji s obzirom na tokove putnika. Usklađenost proračuna i veličina takta osiguravaju optimizaciju prijevoznih sredstava i infrastrukture.

## **1.2 Cilj i hipoteze istraživanja**

Cilj istraživanja je izrada modela taktnog voznog reda temeljenog na vremenskim komponentama minimalnog intervala slijedeđenja u svrhu optimizacije taktnog voznog reda i korištenja infrastrukture u području gradsko-prigradskog prometa. Vremenski parametri minimalnog intervala slijedeđenja vlakova koriste se za smanjenje utjecaja vlakova u zakašnjenju na stabilnost voznog reda. Izrađeni model u ovom radu je rezultat simulacije gradsko-prigradskog područja Grada Zagreba kao najfrekventnijeg prometnog područja u RH. Takav

model je primjenjiv i na manje frekventnim prometnim područjima željezničkih mreža sličnih i/ili istih karakteristika kao što je područje željezničke mreže Grada Zagreba.

S obzirom na izradu modela taktnog voznog reda temeljenog na vremenskim komponentama, kao cilja sveukupnog istraživanja, postavljene su znanstvene hipoteze na kojima se temelji ova disertacija:

- optimizacijom vremenskih komponenti intervala slijeđenja vlakova smanjuje se utjecaj vlakova u zakašnjenju na stabilnost voznog reda
- simulacijski model će pomoću teorije diskretnih događaja i primjenom Petrijevih mreža dokazati optimizaciju intervala slijeđenja vlakova koji utječu na stabilnost voznog reda
- na povećanje postojećih kapaciteta i kvalitetu prijevoza moguće je utjecati primjenom matematičkog modela izračuna pojedinih komponenti intervala slijeđenja vlakova.

### **1.3 Znanstveni i aplikativni doprinos**

Određivanje i pronalaženje znanstvenih tvrdnji, kao rezultat istraživanja opisanih u ovoj disertaciji, čine znanstvene doprinose na kojima se temelji formiranje i izrada modela organizacije putničkog prometa na osnovi vremenskih parametara.

Segmentacijom usluge putničkog prometa optimizira se vozni red i povećava se stabilnost voznog reda. Na taj način se omogućuje točno definiranje podjele putničkog prometa na temelju simulacijskog modela uz utvrđivanje razine optimiziranosti iskorištenja infrastrukture i prijevoznih kapaciteta ovisnih o zahtjevima korisnika temeljenih na koeficijentu iskorištenosti i dnevnim migracijama.

Matematički proračuni služe kao pokazatelji za vrednovanje kvalitete razine prijevozne usluge i prediktivno kretanje tokova putnika.

Postavljanje matematički određenih parametara za točno izračunavanje vremenskih komponenti, od kojih se sastoji minimalni interval slijeđenja vlakova, aplikativno osigurava izradu stabilnog novog voznog reda. Odnosno, u slučaju primjene u automatiziranom sustavu, prilikom pojave vlakova koji kasne u području gradsko-prigradskog prometa, optimizira organizaciju prometa s minimalnim utjecajem na stabilnost voznog reda ostalih vlakova.

### **1.4 Primijenjene znanstvene metode**

U sklopu istraživanja i rješavanja problema koji se javljaju u organizacijskoj strukturi željezničkog prijevoza u ovoj disertaciji su korištene različite znanstvene metode:

- Metoda kompilacije – korištena prilikom pregleda dosadašnjih istraživanja iz domene problematike opisane u ovoj disertaciji na temu formiranja organizacijskog prometnog modela;
- Metoda analize – korištena prilikom definiranja studije slučaja i pronalaženja parametara koji su problematični, odnosno koje je moguće optimizirati drugačijim pristupom;
- Metoda studije slučaja – korištena prilikom ispitivanja modela u realnom okruženju kako bi se mogao usporediti s istraživanim modelom;
- Komparativna metoda – korištena prilikom uspoređivanja rezultata dosadašnjih istraživanja pojedinih elemenata i parametara vezanih uz organizaciju prometa te kod uspoređivanja ključnih parametara studije slučaja i simulacijskog modela;
- Kvantitativna kauzalna metoda – korištena prilikom izrade prediktivne analize u uzročno-posljedičnom odnosu kretanja tokova putnika i učešća željeznice u prijevozu uz upotrebu MS Office Excel alata
- Metoda simulacije i modeliranja – korištena prilikom izrade studije slučaja i simulacijskog modela u svrhu analize i komparacije dobivenih izlaznih rezultata;
- Metoda deskripcije – korištena za opis različitih procesa, elemenata, parametara te međusobnih odnosa i veza pojedinih postupaka u funkcioniranju organizacije prometa u studiji slučaja i simulacijskom modelu;
- Matematička metoda – korištena prilikom određivanja sastavnih elemenata sustava te prilikom prikazivanja pojedinih zakonitosti sustava u području njegove funkcionalnosti;
- Eksperimentalna metoda – korištena za utvrđivanje optimalnih parametara prilikom kreacije simulacijskog modela; najviše Monte Carlo metoda;
- Induktivna metoda – korištena u dijelovima disertacije kada je bilo potrebno na temelju iskustva i zapažanja ponašanja procesa doći do opće prihvatljivih zaključaka.

## 1.5 Pregled dosadašnjih istraživanja

Na prugama HŽ-a i željeznica u okruženju u gradsko-prigradskom prometu se koriste putnički vlakovi iz regionalnog prijevoza. Zbog duljine relacija regionalni putnički vlakovi dolaze u područje gradsko-prigradskog područja najčešće sa zakašnjenjem i smanjenim kapacitetima. Velika vjerojatnost kašnjenja utječe na kvalitetu prijevoza i stabilnost voznog reda.

Analize međusobnog utjecaja vlakova u putničkom prometu pokazuju da svako odstupanje u voznom redu vlakova višeg ranga ima veliki utjecaj na niže rangirane vlakove. Zbog navedenog potrebno je odrediti novo rangiranje (kategorizaciju) vlakova s obzirom na njihove glavne

karakteristike. Za tehnološku optimizaciju putničkog prometa i njegovu reorganizaciju potrebno je odrediti kriterije prema kojima bi se izvršila podjela putničkog prometa. Vremenskim parametrima, kao komponentama određivanja zona vrsta prijevoza u putničkom prometu, određuju se obrtni kolodvori gradsko-prigradskog i regionalnog prometa. U velikim aglomeracijskim centrima postoje šira područja koja gravitiraju prema njima pa se uključivanje u javni prijevoz tih područja postiže uvođenjem zona [2]. Funkcionalnost simulacijskog modela je prilagođena definiranim karakteristikama putničkih vlakova, a proširenje zona javnog prijevoza je postignuto usklađenjem vremenskih parametara prema postavljenim pravilima simulacijskog modela [3].

Istraživanje modela podjele prometa temeljenog na vremenskim parametrima do sada nije našlo svoju primjenu u praksi. U studiji za HŽ Putnički prijevoz [4] prikazano je idejno rješenje podjele putničkog prometa na osnovi vremena vožnji putničkih vlakova, a nastavak idejnog rješenja razrađen je u studiji za nabavku novih motornih garnitura [5]. Navedeno teorijsko istraživanje nije u potpunosti metodološki obrađeno. Elementi integriranog voznog reda moraju biti u skladu s prometnom potražnjom, a utvrđuju se u četiri osnovna koraka:

- u prvom koraku se izrađuje model potražnje za planirano područje;
- u drugom koraku se predviđa razvoj infrastrukture i buduće promjene strukture stanovništva;
- u trećem koraku model potražnje se nadopunjuje planiranim podacima koji su uključeni u buduća planiranja;
- u četvrtom koraku se radi analiza osjetljivosti konkurentskih voznih redova na promjenjivi model potražnje [6, 7].

Planiranje određuje definiciju i smisao urbanog željezničkog prometa, opisuje koncept planiranja i donošenja odluka te se bavi urbanim prijevozom i prometom, njegovim karakteristikama i perspektivom razvoja [8, 9].

Modeliranje prijevozne potražnje je neprekidni proces u kojem važnu ulogu imaju ekonomski ekvivalenti društva prema kojima kvaliteta usluge, uz prihvatljive troškove prijevoza, određuje način izbora prijevoza kod korisnika [10]. Socijalni optimum je imaginarna točka odluke korisnika o korištenju javnog prijevoza. Metode optimizacije željezničke mreže i putničkog prometa te taktnog voznog reda nastale su uporabom prediktivnih metoda i matematičkih alata za modeliranje i simuliranje sustava. Okosnica razvoja simulacijskog modela je optimizacija vremenskih komponenti sustava što doprinosi tehnološkom unapređenju kvalitete usluge [11]. Optimizacija prometa postiže se matematičkim formalizmom Petrijevih mreža [12, 13] te djelomično izmijenjenim algoritmima korištenim u istraživanjima drugih modova prijevoza.



Modeliran i simuliran proces integriranog taktnog voznog reda pomoću Petrijevih mreža omogućava izradu matematičkog modela kojim se dokazuju rješenja minimalnog međusobnog utjecaja vlakova različitih rangova uz maksimiziranje razine usluge i povećanje mrežnih performansi [14].

Tehnološka optimizacija prometa vlakova, uz određivanje minimalnog intervala slijeđenja vlakova, postiže se optimizacijom rezervnog i dodatnog vremena [15, 16, 17]. O tim vremenima ovisi kvaliteta voznog reda.

Optimizacija željezničke infrastrukture se postiže uvođenjem taktnog voznog reda. Određivanjem takta u takvom načinu organizacije prometa omogućavaju se potrebni kapaciteti [18, 19, 20].

## **1.6 Struktura doktorske disertacije**

S obzirom na objašnjene nedostatke koji se javljaju u organizaciji željezničkog prijevoza u radu će se navedena problematika obraditi u tri cjeline uz uporabu vremenskih parametara za određivanje dodatnih vremena kroz istraživanja pomoću matematičkog modela.

Prva cjelina sadrži tehnološke kriterije organizacije prijevoza gdje će vremenski parametri biti u funkciji definiranja vrsta putničkog prometa.

Analizom utjecaja vlakova višeg na vlakove nižeg ranga u vremenskom razdoblju od tri mjeseca tijekom izmjene voznog reda, čime su obuhvaćene analize dva važeća vozna reda, velika vjerojatnost je da vlakovi višeg ranga i putnički vlakovi u regionalnom prometu zbog duljine svojih relacija ulaze u područje gradsko-prigradskog prometa sa zakašnjenjem pri čemu imaju veliki utjecaj na stabilnost voznog reda gradsko-prigradskih vlakova.

Glavne karakteristike vrsta prometa čine vrijeme vožnje te podjela prometa prema vremenskoj udaljenosti od aglomeracijskog centra. Cjelina će biti podijeljena u tri faze. Prva faza je analiza postojećeg sustava studijom slučaja gdje će naglasak biti na analizi parametara koji utječu na stabilnost voznog reda. Naredna analiza će biti provedena na infrastrukturnim i voznim kapacitetima gdje će infrastrukturni kapaciteti biti vezani uz karakteristike pruga i njihovu propusnost, a vozni kapaciteti uz broj vlakova prema ponudi važećeg voznog reda. S obzirom na podjelu vlakova u voznom redu gdje nisu definirane podjele vlakova prema pripadnosti prometu (gradsko-prigradski Promet – GPP, regionalni Promet – RP) već je podjela napravljena prema komercijalnim karakteristikama, nije moguće točno odrediti koliki broj putnika GPP-a koristi vlakove RP-a. Naglasak provjere kapaciteta bit će u gradsko-prigradskom području, kao i poziciji trenutne ponude s obzirom na socijalni optimum i kvalitetu pružene usluge.

Kao referentna točka u analizi proračuna studije slučaja određena je dionica pruge Dugo Selo – Sesvete – Zagreb Borongaj, a za proračun su korišteni vremenski intervali i vlakovi koji se zaustavljaju u kolodvorima i stajalištima zbog ulaza i izlaza putnika. Definirano je šest različitih dnevnih vremenskih intervala kod kojih se razlikuje koeficijent popunjenosti ovisan o dnevnim migracijama korisnika željezničkog prijevoza.

Druga faza će prikazati istraživanja mogućnosti unapređenja dijelova sustava u kojima je to moguće drugačijim pristupom ili izvedbom kao što je drugačija kategorizacija vlakova i njihova pripadnost vrsti prometa. Istraživani model prikazuje točnu podjelu vrsta putničkog prometa, prednosti i nedostatke koji se pri tome javljaju te utjecaj takve podjele na stabilnost voznog reda. Kao i u prvoj cjelini unapređenja će se temeljiti na vremenskim komponentama. U ovom slučaju, vremenskim komponentama će biti određivani obrtni kolodvori kao granice podjele vrsta prometa.

U drugoj cjelini bit će obrađeni tehnološki kriteriji za stabilnost voznog reda. U tehnologiji željezničkog prometa veliku ulogu u stabilnosti voznog reda imaju dodatna i rezervna vremena koja se pribrajaju prosječnom minimalnom intervalu slijeđenja vlakova. UIC<sup>1</sup> (Union internationale des chemins de fer) je pri izračunavanju istih dao preporuku za izračunavanje koja se temelji na prosječnosti. Takav način proračuna daje mogućnost optimizacije određivanja dodatnih vremena kako bi se povećala iskorištenost infrastrukture i vozila.

U fazi analize će se analizirati podjela vlakova u putničkom prometu i njihova pripadnost vrstama prometa te kvaliteta ponude prijevozne usluge u gradsko-prigradskom prometu. Prediktivnom analizom utvrdit će se točke u sustavu kod kojih dolazi do narušavanja stabilnosti voznog reda te tokovi putnika koji koriste željeznički prijevoz u svojim dnevnim migracijama kako bi se usporedili prednosti i nedostaci istraživanog sustava. Bit će uspoređena studija slučaja i istraživani model te utjecaj njihovih organizacija prometa na stabilnost voznog reda, kapacitete i iskorištenost infrastrukture.

U ovoj fazi se prikazuje uvođenje taktnog prometa u sklopu predložene podjele prometa, način manipulacije kapacitetima određivanjem takta u uvedenom taktnom prometu te optimizacija iskorištenja prijevoznih kapaciteta.

U trećoj cjelini izrađen je simulacijski model primjenom vremenskih hibridnih i obojenih Petrijevih mreža korištenjem programskog paketa Yasper.

Simulacijski model studije slučaja izrađen je na temelju srednjih vrijednosti vremenskih intervala i pojave standardnih devijacija te utvrđivanjem kritičnih točaka sustava te uskih grla

---

<sup>1</sup> Međunarodna željeznička unija (eng. The International Union of Railways)

koja se pri tom javljaju. Osim analize vremenske dinamike izvršena je i analiza iskorištenosti pojedinih resursa u sustavu. Na taj način će biti utvrđen i definiran utjecaj nedostataka sustava na stabilnost voznog reda.

Simulacija istraživnog modela temelji se na vremenskim parametrima, predloženoj podjeli i kategorizaciji vlakova. Simulacijski model sadrži dobivene optimizirane rezultate organizacijske cjeline. Provjerena je stabilnost voznog reda, pojava mogućih konflikata i rješenja njihovog minimiziranja.

Usporedbom izrađenog simulacijskog i modela studije slučaja pokazat će se prednosti i eventualni nedostaci kao rezultat treće cjeline ovog rada.

U fazi testiranja simulacijskih modela naglasak je na provedbi i stabilnosti voznog reda. Simulacijski model studije slučaja prikazuje podatke koji prediktivnom analizom nude predviđanje mogućnosti postojećeg sustava te moguće prognostičke rezultate. Istraživani simulacijski model prikazuje provedbu i stabilnost voznog reda metodom Monte Carlo.

U zaključku su sumirani rezultati koji dokazuju znanstveni doprinos prema postavljenim tezama istraživanja te prednosti i nedostatke predloženog modela temeljenog na vremenskim parametrima u svim segmentima ustrojstva putničkog prometa u odnosu na analiziranu studiju slučaja.

## 2 Tehnološki kriteriji organizacije prijevoza

### 2.1 Organizacija željezničkog prometa

Organizacija željezničkog prometa odvija se prema strogo utvrđenim pravilima. Tijekom odvijanja procesa prijema i otpreme vlaka iz kolodvora postupci se moraju odvijati točno određenim redoslijedom. Postupci za sigurnu vožnju vlaka odnose se na:

- prijem vlaka iz susjednog kolodvora,
- prijem vlaka u kolodvor
- otpremu vlaka iz kolodvora

Svaki od navedenih postupaka može biti izvršen ako su ispunjeni određeni uvjeti. Međutim, kod svakog uvjeta postoje dodatne mogućnosti koje određuju naredne postupke tipa „Ako-Onda-Inače“. Uz uvjete za organizaciju prometa bitni su i uvjeti koji osiguravaju neometano odvijanje prometa sa sigurnosnog aspekta ugrađene opreme i sustava. Uvjet za ugradnju sigurnosnih sustava i uređaja je zadovoljavanje SIL4 (Safety integrity level)<sup>2</sup> razine sigurnosti [21].

Organizacija prometa, ovisna o tehničkim karakteristikama prometnog sustava i o načinu upravljanja, vrši se na dva načina:

- organizaciju prometa provode eksperti, a odluke se temelje na njihovom znanju i iskustvu
- organizaciju prometa izvršavaju ekspertni sustavi na temelju baze znanja eksperata.

Razvoj automatizacije i inteligentnih upravljačkih sustava u željezničkom prometnom sustavu omogućava stvaranje baze znanja eksperata iz područja upravljanja prometom i aplikacija koje koriste te baze za upravljanje i organizaciju optimalnog odvijanja prometa. Osnovne značajke ekspertnog sustava su:

- jedinstvene baze koordiniranog znanja eksperata iz određene domene
- mogućnost izvršavanja bilo kada i bilo gdje
- modularnost i lagana izmjena i dopuna ugrađenog znanja
- mogućnost objašnjavanja i zaključivanja

---

<sup>2</sup> Određivanje ciljane razine smanjenja rizika

- heurističko zaključivanje
- objedinjavanje teorije i primjena umjetne inteligencije.

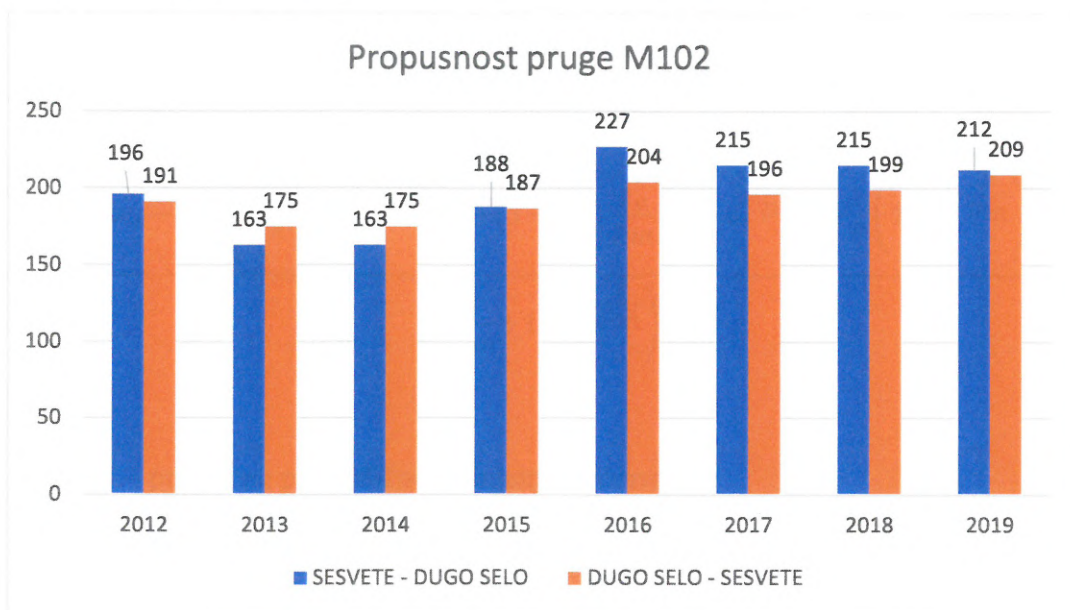
Funkcionalnost ekspertnih sustava sačinjava objedinjenost teorije i umjetne inteligencije stvorene na osnovi algoritamskog i heurističkog pristupa [22].

Današnji zahtjevi koji se postavljaju pred javni prijevoz su prije svega:

- konkurentnost
- optimalno iskorištenje resursa
- automatizacija procesa
- fleksibilnost usluge s obzirom na zahtjeve korisnika
- pouzdanost i dostupnost usluga
- veća komercijalna brzina i kraće vrijeme obrta.

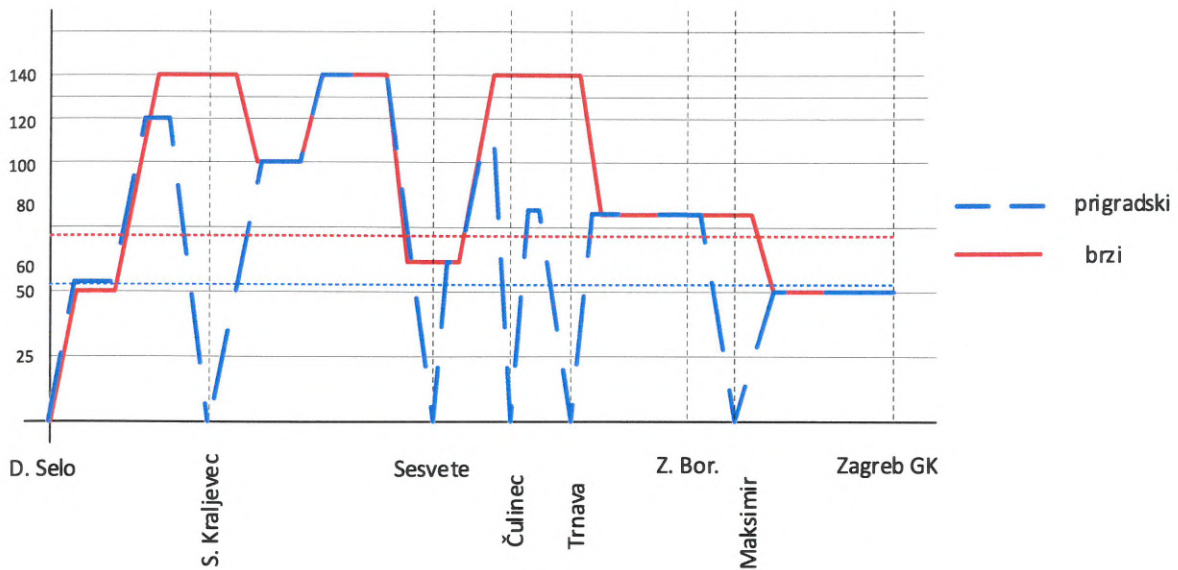
Komercijalna brzina je prosječna brzina kojom vlak prijeđe svoju relaciju u jedinici vremena, a ovisna je o stanju infrastrukture i voznom redu tog vlaka. U studiji slučaja na relaciji Dugo Selo – Zagreb komercijalna brzina prigradskih vlakova iznosi 48 km/h, a brzih vlakova 78 km/h.

Stanje infrastrukture moguće je analizirati propusnošću pruge. Ukoliko je pruga redovito i kvalitetno održavana, propusnost je jednaka ili približno jednaka projektiranoj. Prema grafikonu (Slika 1) moguće je analizirati kvalitetu održavanja pruge.



Slika 1: Propusnost pruge Dugo Selo – Sesevete (Izvor: HŽ Infrastruktura)

U slučaju nedovoljno kvalitetnog održavanja uvode se dionice sa smanjenom brzinom koje imaju utjecaj na komercijalnu brzinu vlakova (Slika 2).



Slika 2: Dijagram brzina prigradskih i brzih vlakova

Vrijeme obrta je ukupno vrijeme potrebno jednoj garnituri da se pokrene iz polaznog prema uputnom kolodvoru i vrati u polazni kolodvor.

Optimalno planiranje organizacije prometa znači kvalitetno donošenje odluka kod nastanka nepredviđenih poremećaja. Poremećaj nastaje kada dođe do odstupanja od predviđenog voznog reda. Razlikuju se u teretnom i putničkom prometu te na prugama s mješovitim prometom, ali imaju jednak utjecaj na ukupan promet.

S obzirom na vjerojatnost kašnjenja vlakova višeg ranga i njihovog utjecaja na vlakove GPP-a, prosječno posljedično kašnjenje vlakova [23] nižeg ranga je moguće izračunati izrazom (1):

$$\bar{p}_f = \frac{p_m \cdot \left( w_e - \frac{w_e^2}{2} \right) \cdot \left[ w_g \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\bar{z}_g}{p_m}} \right)^2 + (1 - w_g) \cdot \frac{\bar{z}_v}{p_m} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot \bar{z}_v}{p_m}} \right) + \frac{\bar{z}}{\bar{r}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\bar{z}}{p_m}} \right)^2 \right]}{\left( \frac{\bar{r}}{p_m} + 1 - e^{-\frac{\bar{z}}{p_m}} \right)} \quad (1)$$

gdje su:

- $\bar{p}_f$  – prosječno posljedično kašnjenje vlakova
- $p_m$  – prosječno kašnjenje vlakova istih karakteristika u dolasku
- $w_e$  – vjerojatnost pojave kašnjenja

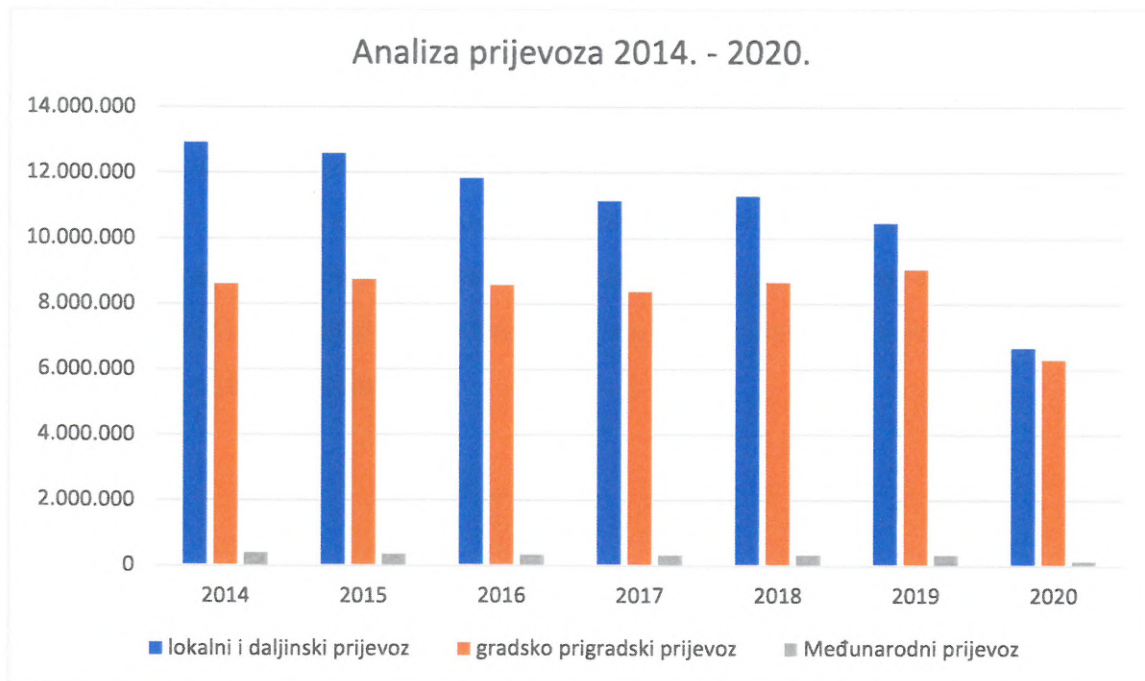
- $w_g$  – vjerojatnost pojave kašnjenja vlakova istog ranga
- $\bar{z}_g$  – prosječno minimalno zauzeće prostornog odsjeka pri slijeđenju vlakova istog ranga
- $\bar{z}_v$  – prosječno minimalno zauzeće prostornog odsjeka pri slijeđenju vlakova različitog ranga
- $\bar{z}$  – prosječno zauzeće prostornog odsjeka
- $\bar{r}$  – prosječno rezervno vrijeme (engl. „Buffer time“).

Prema važećoj tehnologiji organizacije prometa vlakova, na dionici studije slučaja prosječno posljedično kašnjenje zbog čekanja na pretjecanje iznosi  $\bar{p}_f = 11,22$  minute.

## 2.2 Analiza tokova putnika u funkciji organizacije putničkog prometa

Da bi se napravio kvalitetan plan kapaciteta za buduće razdoblje, potrebno je pratiti tokove putnika i napraviti analizu prethodnog razdoblja.

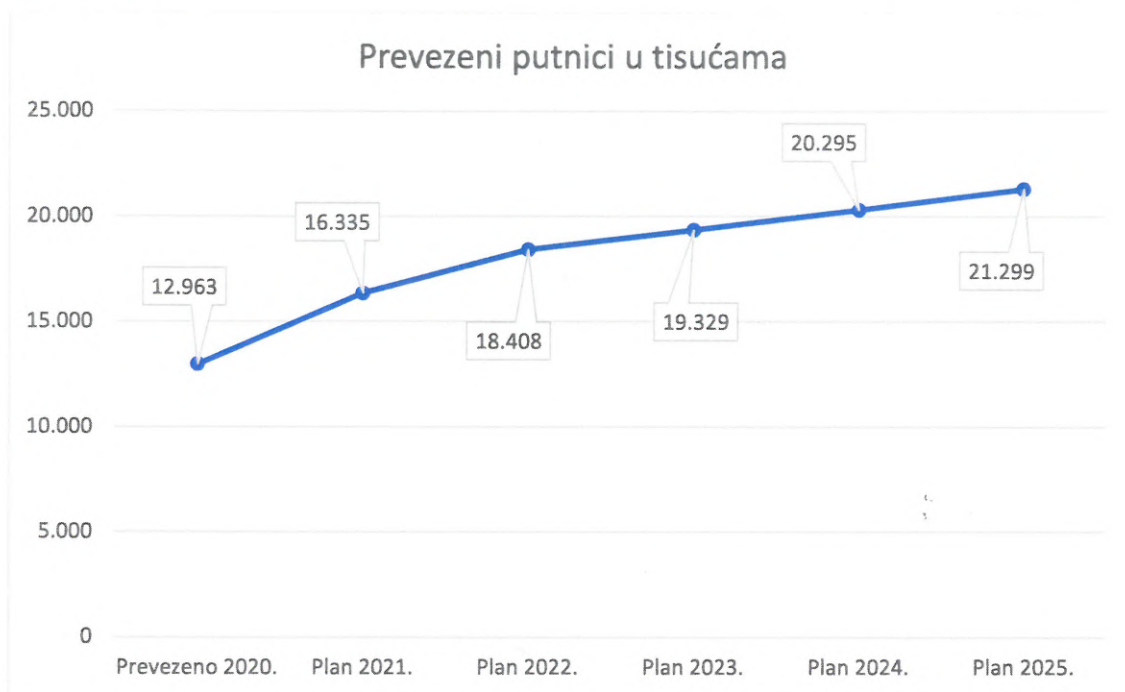
Analiza provedena na temelju podataka prevezenih putnika u međunarodnom i unutarnjem prometu za razdoblje 2014. – 2020. godine (Slika 3) podloga je za predikciju optimizirane organizacije putničkog prometa.



Slika 3: Grafički prikaz tokova putnika (Izvor HŽ PP)

Prema prikazanom grafikonu analize prijevoza putnika prisutno je smanjenje u broju prevezenih putnika, međutim, razlika u unutarnjem prometu između lokalnih i daljinskih

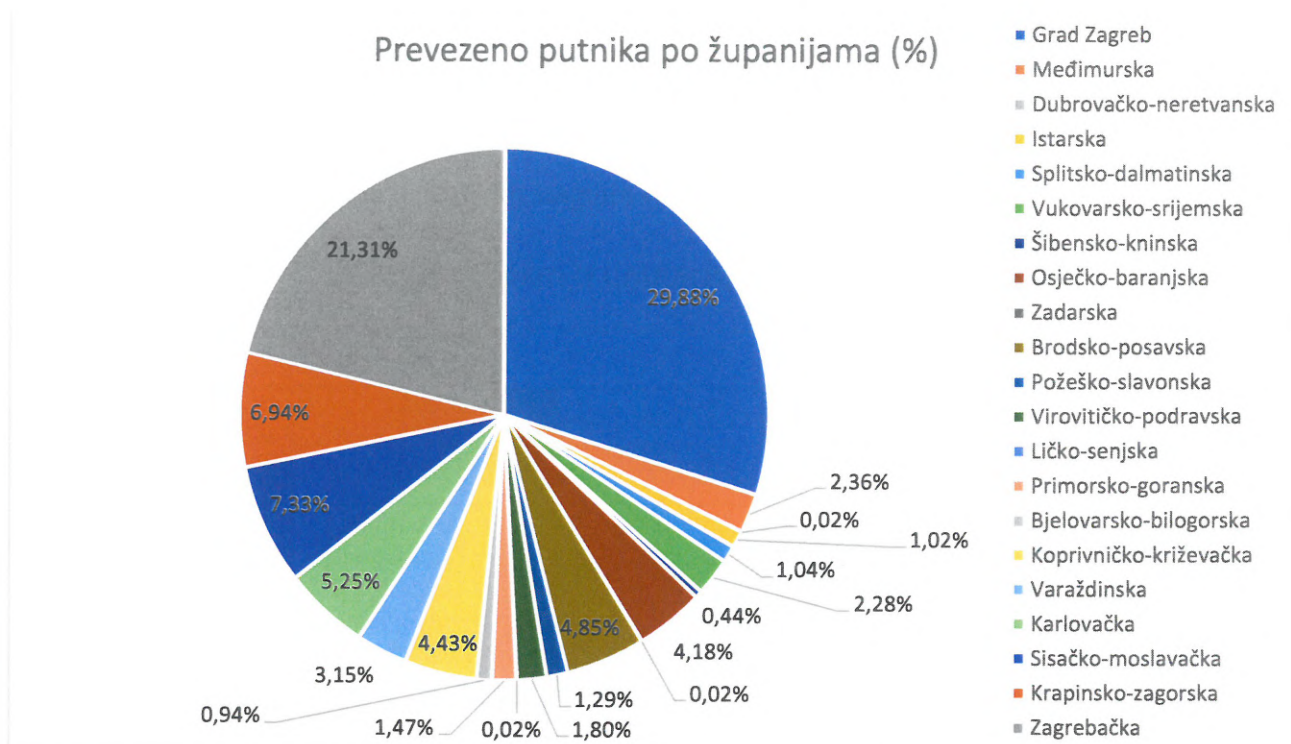
vlakova te vlakova gradsko-prigradskog prometa se smanjuje što pokazuje da su tokovi putnika gradsko-prigradskog prometa u porastu. Zbog takvog kretanja tokova putnika predikcijom se očekuje godišnji porast u gradsko-prigradskom prometu. Prema planu poslovanja HŽ PP-a za razdoblje 2020. – 2025. očekuje se porast broja prevezenih putnika u unutarnjem prometu u 2021. godini od 26%, u 2022. godini 13% te od 2023. – 2025. godine porast od 5% godišnje (Slika 4Slika 4).



Slika 4: Grafički prikaz plana poslovanja HŽPP (Izvor: HŽPP)

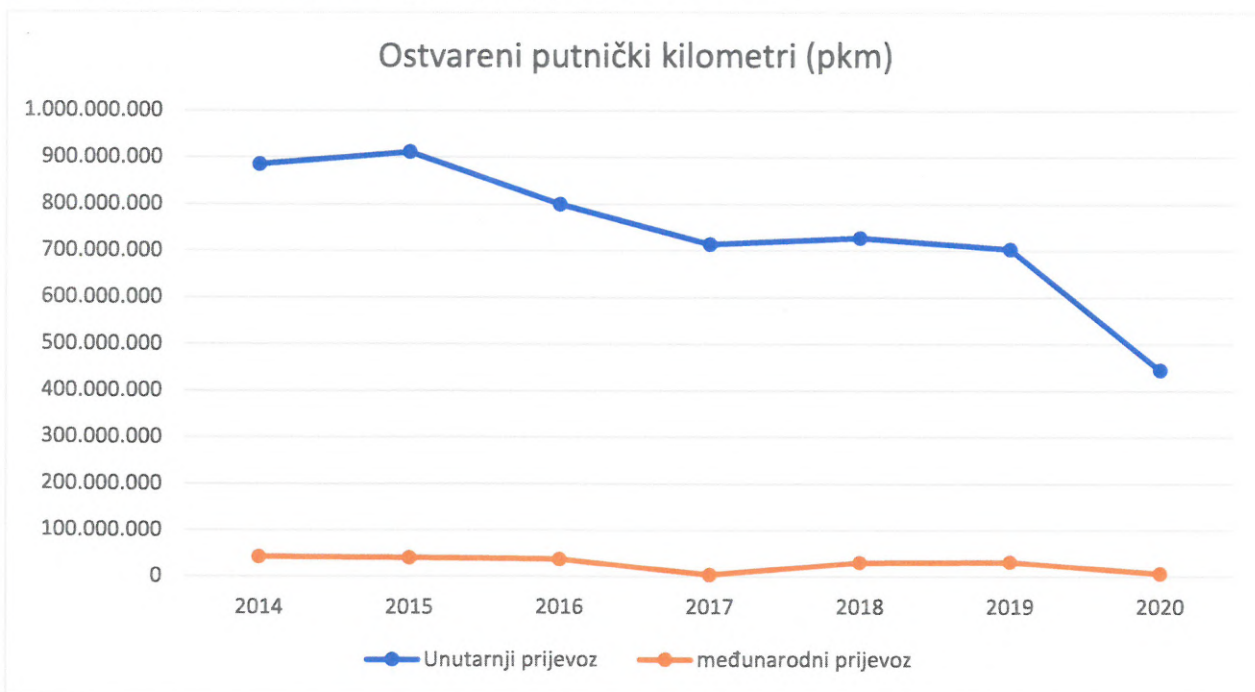
Na području Hrvatske je detektirano pet urbanih centara sličnih ili istih prometnih karakteristika u čijem području je moguće organizirati integrirani javni prijevoz sa željezničkim prometom kao okosnicom takvog prijevoza. Centri urbanih sredina su gradovi: Zagreb, Osijek, Varaždin, Rijeka i Split. Na Grad Zagreb i Zagrebačku županiju u unutarnjem prijevozu otpada više od 50% prevezenih putnika (Slika 5).





Slika 5: Udio u prevezenim putnicima po županijama (Izvor: HŽPP)

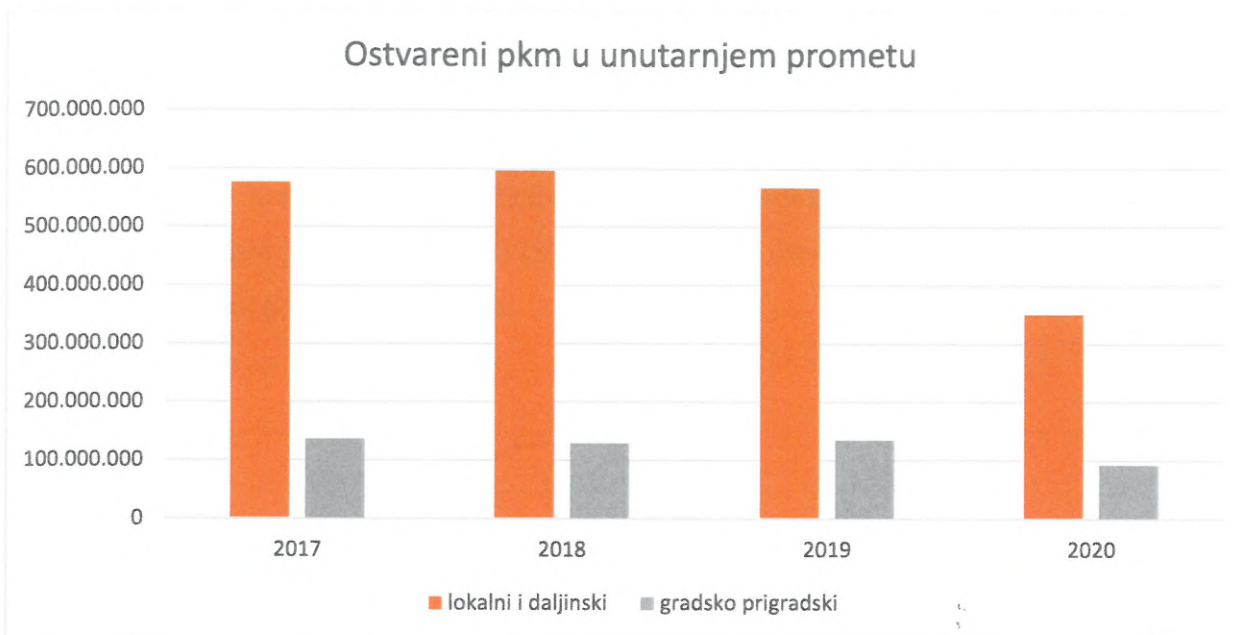
Osim broja prevezenih putnika analiziran je broj ostvarenih putničkih kilometara (pkm) kao pokazatelj duljina relacija na kojima je taj prijevoz ostvaren.



Slika 6: Ostvareni pkm za razdoblje 2014. – 2020. (Izvor: HŽPP)

U prikazanom grafikonu (Slika 6) analiza prevezenih putnika u međunarodnom prometu (manji broj putnika koji ostvaruje veće pkm) rezultira velikim padom ostvarenih pkm. U unutarnjem

prometu tokovi putnika pokazuju veći broj putnika na kraćim relacijama što je pokazatelj sve većeg korištenja vlakova gradsko-prigradskog prometa. Daljnjom analizom ostvarenih pkm u unutarnjem prometu, ostvareni pkm lokalnog i daljinskog prometa su u padu dok ostvareni pkm gradsko prigradskog prometa u prosjeku stagnira (Slika 7).



Slika 7: Ostvareni pkm u unutarnjem prometu (Izvor: HŽPP)

Dnevne migracije koje se događaju u urbanom okruženju zahtijevaju velike kapacitete javnog prijevoza. U gradovima poput Zagreba gdje je cestovna infrastruktura neprilagođena velikom broju osobnih vozila, analizom je utvrđeno da jedno osobno vozilo prosječno koristi 1,2 putnika. Analiza je rađena u razdoblju od 30 dana, radnim danom u vrijeme vršnog opterećenja na uzorku 100 – 120 vozila.

Tablica 1: Analiza iskorištenja osobnih vozila (Izvor: autor)

Dani	samo vozač	vozač+ suputnik	ukupno	%	odnos
ponedjeljak	82	18	100	18,0%	1,2
utorak	100	20	120	16,7%	1,2
srijeda	85	15	100	15,0%	1,2
četvrtak	81	19	100	19,0%	1,2
petak	100	18	118	15,3%	1,2
				<b>17%</b>	<b>1,2</b>

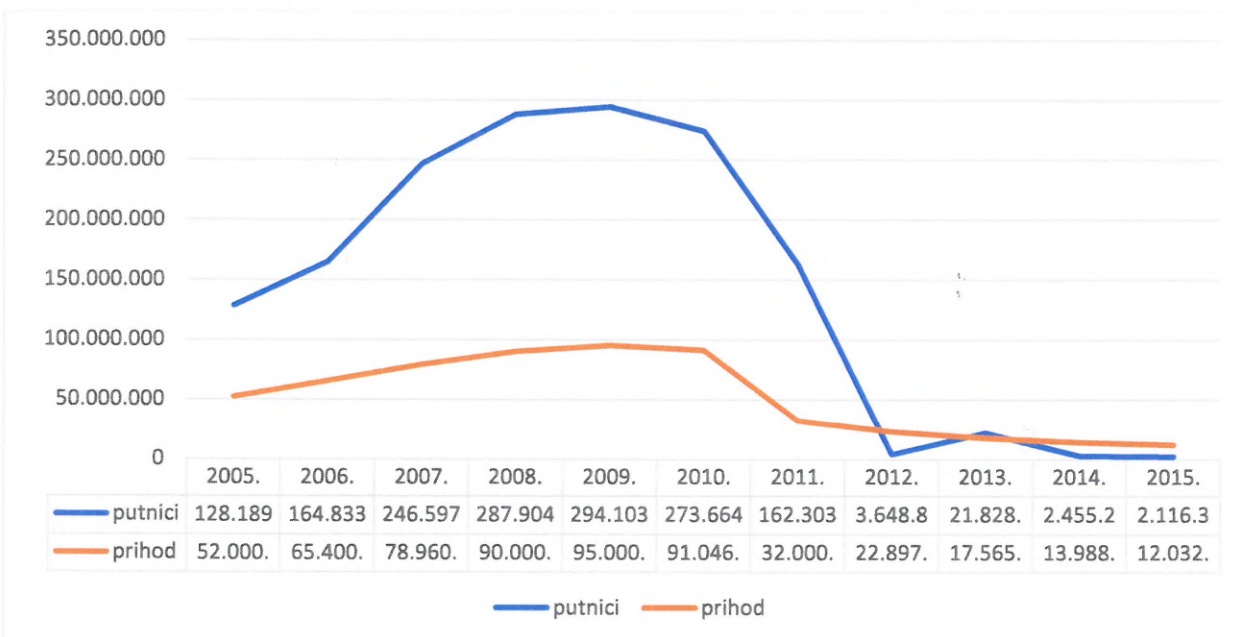
U Tablica 1 su prikazani radni dani u tjednu te prosječan broj vozila u kojima je samo vozač i prosječan broj vozila u kojima se nalaze vozač i suvozač. Broj vozila u vršnim satima opterećenja u kojima ima više od dva putnika (vozač i suvozač) je zanemariv pa stoga nije naveden u statistici. Zbog navedenog dolazi do zagušenja cestovne infrastrukture u urbanim

sredinama. Prema DZS-u<sup>3</sup> u razdoblju 2007. – 2013. godine udio osobnih vozila u prijevozu je iznosio 59,6%.

Jedna elektro-motorna garnitura u gradsko-prigradskom prometu kapaciteta 450 putnika usporedbom prosječnog broja putnika u osobnim vozilima zamjenjuje 375 osobnih vozila.

Koeficijent popunjenosti garnitura gradsko prigradskog prometa u vršnim satima opterećenja prosječno iznosi 92% [24].

HŽ PP nema kvalitetno izrađen matematički model brojanja putnika, već se mjeri protok putnika njihovim prebrojavanjem u službenim mjestima prilikom ulaska ili izlaska iz vlaka. Takav model ne daje pouzdane podatke (Slika 8), a prihodi ostvareni prodajom karata ne prate trend kretanja broja prevezenih putnika.



Slika 8: Grafikon kretanja broja prevezenih putnika (Izvor: HŽPP)

Potrebni kapaciteti ovise o parametrima koji obuhvaćaju dio dana, dan u tjednu i smjer putovanja. Za određivanje kapaciteta potrebni su sljedeći parametri:

- broj vlakova u vršnim satima opterećenja
- broj vlakova u ostalim dijelovima dana
- popunjenost vlaka
- iskorištenost relacije
- broj nedefiniranih putnika.

Koeficijent popunjenosti vlaka je promjenjiv ovisno o dijelu dana. Podjelom na nekoliko vremenskih intervala moguće je proračunati prosječni dnevni kapacitet popunjenosti putničkih

<sup>3</sup> Državni zavod za statistiku

garnitura. Proračun se temelji na svakoj referentnoj točki relacije koju možemo definirati kao najopterećenije mjesto na promatranoj relaciji s obzirom na tokove putnika.

S obzirom na podjelu vlakova u voznom redu gdje nisu definirane podjele vlakova prema pripadnosti prometu (GPP, RP), nije moguće točno odrediti koliki broj putnika iz GPP-a koristi vlakove RP-a.

Kao referentna točka proračuna u GPP-u Grada Zagreba određena je relacija Sesvete – Zagreb GK, a za proračun se koristi šest dnevnih vremenskih intervala i ukupno 65 vlakova koji imaju bavljenje u kolodvorima<sup>4</sup> i stajalištima zbog ukrcaja i iskrcaja putnika.

U 2015. godini sa 298 radnih dana, na predmetnoj relaciji je, prema prosječnom iskorištenju kapaciteta, prevezeno 3.005.985,6 putnika u 18.774 vlakova maksimalnog kapaciteta 8.110.368 putnika, čime je prosječan godišnji postotak popunjenosti radnim danom iznosio 37,07%.

Uzimajući u obzir da se kupnjom mjesečnih karata ne može odrediti koliko dana se koriste za vožnju, te da se radi o mjesečnim učeničkim/studentским i radničkim pretplatnim kartama, stvorene su sljedeće pretpostavke:

- mjesečne učeničke/studentске pretplatne karte koriste se u dane Po – Pe
- mjesečne radničke pretplatne karte koriste se u dane Po – Su
- povratne i RVC prijevozne karte se koriste u sve dane.

Prema ovim pretpostavkama za vrijeme prometovanja smanjenog broja vlakova u ostale dane prosječni dnevni koeficijent popunjenosti drastično se smanjuje i kreće se 0,10 – 0,25.

Prema podacima HŽPP-a od 218.356 prodanih karata (Tablica 2) na predmetnoj relaciji 8.325 je prodanih mjesečnih karata, 33.061 prodanih karata za povratno putovanje, a za cjelokupnu relaciju evidentirano je 70 korisnika godišnjih pretplatnih karata P-2 i P-2d.

Tablica 2: Broj otpremljenih putnika po službenim mjestima za razdoblje 01.08. – 31.12.2015. godine:

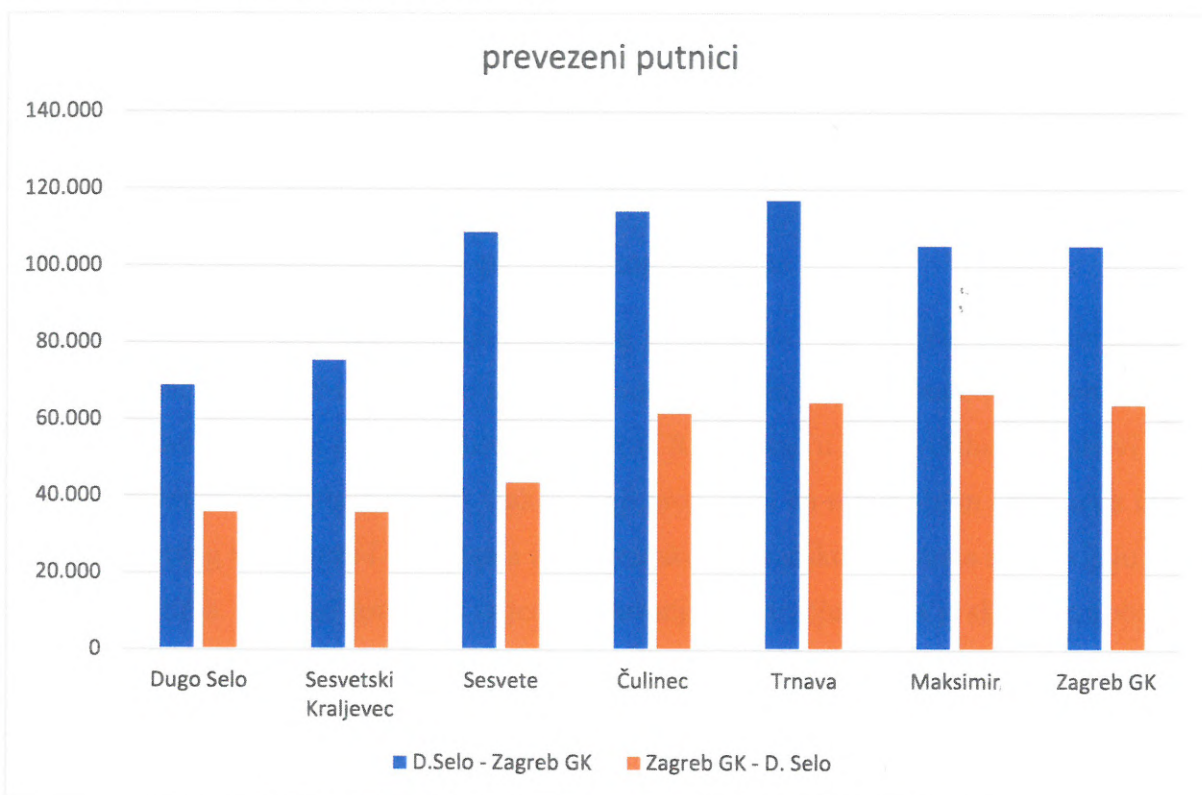
službeno mjesto	broj prodanih karata po relaciji putovanja						
	Dugo Selo	Sesvetski K.	Sesvete	Čulinec	Trnava	Maksimir	Zagreb GK
Dugo Selo		875	9.623	2.691	3.066	9.684	42.829

<sup>4</sup> Uključeni su i lokalni putnički i ubrzani vlakovi koji imaju bavljenje u kolodvoru

Sesvetski Kraljevec	441		687	109	194	569	5.931
Sesvete	7.021	830		109	1.199	3.201	39.121
Čulinec	1.273	195	491		6	351	7.939
Trnava	934	281	921	2		156	7.191
Maksimir	2.144	261	1.226	159	107		2.235
Zagreb GK	23.839	6.752	23.360	4.627	4.302	1.100	

Izvor: HŽPP

Prema navedenoj tablici može se odrediti kretanje potrebnih kapaciteta kroz relacijski slijed službenih mjesta i prema tome možemo odrediti relevantnu točku mjerenja potrebnih kapaciteta. Način praćenja broja putnika prema prodanim prijevoznim kartama može odrediti koeficijent iskorištenosti relacije (Slika 9).



Slika 9: Potrebni kapaciteti kroz relacijski slijed službenih mjesta

Praćenjem svakodnevnih kretanja tokova putnika (Slika 10) te iskorištenosti kapaciteta pojedine garniture, prijevoznik može odgovoriti na zahtjeve putnika te unaprijediti kvalitetu pruženih usluga korigiranjem zahtjeva u izmjenama i dopunama važećeg voznog reda koje se vrše svaka dva mjeseca i/ili u nepredvidljivim situacijama, kao što je trenutna pandemijska situacija s COVID 19, kada se odlukama vlasti moraju smanjiti kapaciteti jedinica prijevoza zbog sigurnosti korisnika.



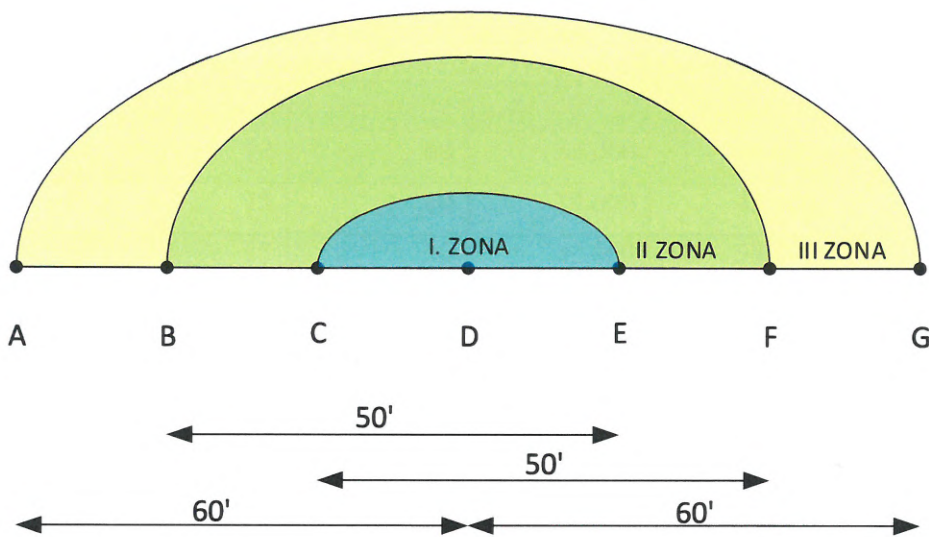
*Slika 10: Svakodnevna analiza na osnovi koje se mogu zahtijevati izmjene i dopune voznog reda*

Zbog pojave većeg zahtjeva za kapacitetima u urbanim sredinama, poput Grada Zagreba, potrebna je optimizacija organizacije prometa s naglaskom na novu kategorizaciju putničkih vlakova predloženu u ovom radu.

### **2.3 Utvrđivanje zona gradsko-prigradskog prometa**

U predloženom modelu segmentacije putničkog prometa na osnovi vremenskih komponenti putovanja, područje GPP-a određeno je vremenom putovanja od 60 minuta. U toj zoni vlakovi GPP-a zaustavljaju se na svim stajalištima, vlakovi RP-a samo u kolodvorima, a vlakovi DP-a samo u kolodvorima obrta. Putnički vlakovi koji prometuju na regionalnim relacijama nakon prolaska obrtnog kolodvora i napuštanja zone gradsko-prigradskog prometa zaustavljaju se na svim stajalištima. Takvom podjelom vrijeme putovanja u području GPP-a je skraćeno s obzirom na to da se vlakovi zaustavljaju samo u kolodvorima te se njihov radijus putovanja u vremenskom intervalu od 60 minuta prostorno povećava. Navedenim modelom pruža se mogućnost tarifnog uključivanja putničkih vlakova iz regionalnog prijevoza u gradsko-prigradski promet na osnovi vremenske komponente putovanja. Kako je vrijeme putovanja određeno vremenskim parametrom od 60 minuta, u organizacijskom smislu to znači da su to i dalje vlakovi regionalnog prometa, ali ulaze u treću zonu gradsko-prigradskog prometa, čime se tarifno proširuje zona GPP-a. Konkretno se to odnosi na manji broj zaustavljanja jer se vlakovi ne zaustavljaju na stajalištima unutar područja prve i druge zone GPP-a nego samo u kolodvorima, a njihovo uključivanje u novoformiranu treću zonu GPP-a podrazumijeva zaustavljanje i na stajalištima izvan zone GPP-a. Kako je već navedeno, to je tarifni, ali ne i prostorni dio GPP-a tako da se karakteristike vlakova podijeljenih u tri vrste putničkog prometa

ne mijenjaju. Kolodvori ili stajališta koja su unutar vremena vožnje od 60 minuta kod regionalnih putničkih vlakova nisu i njihovi krajnji kolodvori.



Slika 11: Podjela gradsko-prigradskog područja u zone

Vremenski parametri određivanja zona u gradsko-prigradskom prometu imaju veliku ulogu u kvaliteti pružene usluge, a podjednako opterećuju prijevoznika i upravitelja infrastrukture. Prijevoznik povećava kvalitetu usluge nabavom novih prijevoznih sredstava, dok upravitelj infrastrukture sudjeluje u povećanju kvalitete usluge izgradnjom nove infrastrukture i kvalitetnim održavanjem postojeće, osiguravajući komercijalnu brzinu vlakova približno jednaku projektiranim brzinama.

Na osnovi istraživanih vremenskih parametara određeni su obrtni kolodvori te se definiranim vremenskim parametrom određuju zone kao dio zajedničkog gradsko-prigradskog prometa (Slika 11):

- I. ZONA → C - E
- II. ZONA → B - C i E - F
- III. ZONA → A - B i F - G

Prema karakteristikama vlakovi GPP-a se zaustavljaju na svim stajalištima i kolodvorima prve i druge zone unutar obrtnog vremena od 50 minuta, dok se putnički vlakovi regionalnog prometa zaustavljaju na stajalištima treće zone unutar vremenskog intervala od 60 minuta.

Određivanje zona GPP-a na temelju vremenskih parametara ovisi o stanju infrastrukture, odnosno o prosječnoj komercijalnoj brzini vlaka. Pomoću referentne komercijalne brzine i

definiranih vremenskih parametara za maksimalne udaljenosti moguće je izračunati radijus područja GPP-a, tj. koja je maksimalna udaljenost obrtnih kolodvora unutar područja GPP-a (Tablica 3). U stupcu „%“ prikazan je postotak povećanja, odnosno smanjenja područja GPP-a s obzirom na kvalitetu infrastrukture koja se odražava iznosom komercijalne brzine vlakova.

Tablica 3: Odnos kvalitete infrastrukture i krajnjih udaljenosti zona GPP-a

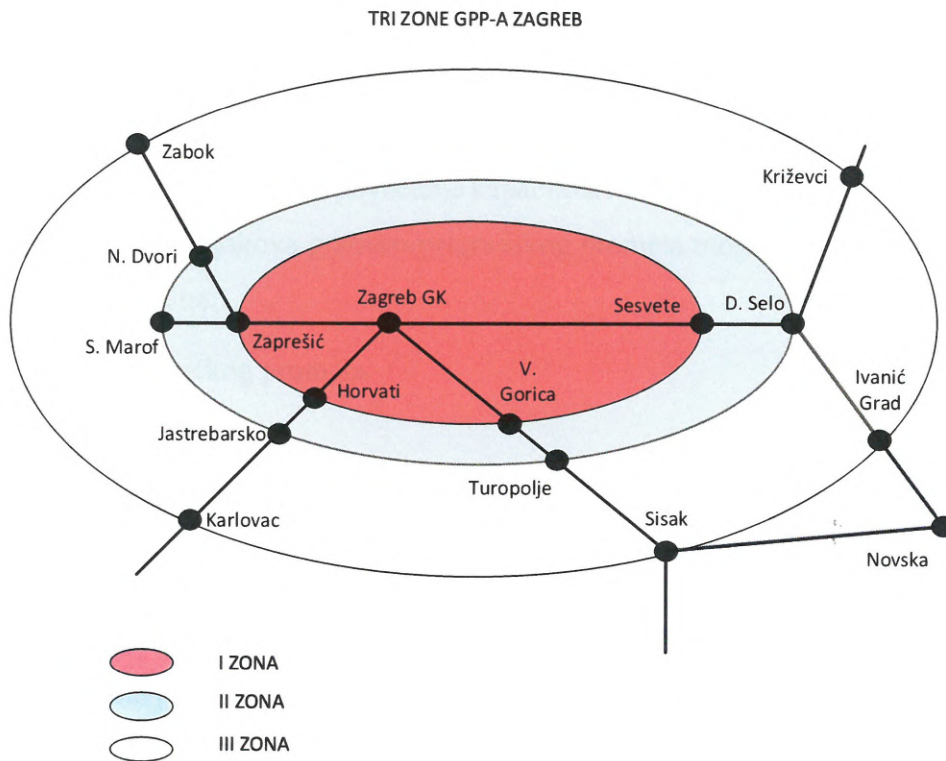
$V_k(m/s)$	$V_k'(m/s)$	$t(min)$	$l(m)$	$l'(m)$	%
11	12	50	33.000	36.000	8%
11	12	60	39.600	43.200	8%
11	13	50	33.000	39.000	15%
11	13	60	39.600	46.800	15%
11	14	50	33.000	42.000	21%
11	14	60	39.600	50.400	21%
11	15	50	33.000	45.000	27%
11	15	60	39.600	54.000	27%
11	10	50	33.000	30.000	-10%
11	10	60	39.600	36.000	-10%
11	9	50	33.000	27.000	-22%
11	9	60	39.600	32.400	-22%
11	8	50	33.000	24.000	-38%
11	8	60	39.600	28.800	-38%
11	7	50	33.000	21.000	-57%
11	7	60	39.600	25.200	-57%

U prvom stupcu tablice je referentna komercijalna brzina vlakova GPP-a ( $V_k(m/s)$ ) preuzeta iz važećeg voznog reda 2020./21. Povećanjem ili smanjenjem komercijalne brzine u drugom stupcu posljedično se povećava ili smanjuje radijus kretanja vlakova unutar definiranog vremenskog parametra.

Kretanje tokova putnika u dnevnim migracijama je u porastu. Metodama analize i komparacije dobiveni rezultati potreba u analiziranom vremenskom razdoblju za kapacitetima osnova su predikcije planiranja budućih kapaciteta. Nepredviđene potrebe za povećanje kapaciteta osiguravaju se određivanjem kritičnih postotaka iskorištenosti kapaciteta. Optimizacija kapaciteta postiže se reguliranjem vremenskog intervala u taktom prometu. Glavna komponenta za određivanje takta je koeficijent iskorištenosti. Najveći koeficijent iskorištenosti je u intervalima vršnih opterećenja te je u tim intervalima potrebno planiranje maksimalnih kapaciteta.



Veliko područje Grada Zagreba i okolnih županija gravitacijski pripada Zagrebu. Dnevne migracije korisnika iz svih smjerova zahtijevaju velike kapacitete i kraća vremena putovanja u odlasku i povratku. Područje Grada Zagreba i okolnih županija prema predloženom modelu i stanju infrastrukture moguće je prema opisanom konceptu podjele područja podijeliti na prostorne i tarifne zone (Slika 12).



Slika 12: Primjena vremenske koncepcije određivanja GPP-a u gravitacijskoj zoni Zagreba

Skraćenje dnevnih vremena provedenih na putu povećava kvalitetu života korisnika i smanjuje javne servisne troškove. U te troškove spadaju održavanje prometnica, osiguravanje parkirnih mjesta, smanjenje zagađenja te smanjenje zakrčenosti ulaznih cestovnih pravaca u grad<sup>5</sup>.

Implementacijom podjele prometa na vremenske komponente (GPP, RP i DP) te uvođenjem taktnog prometa, postojeći kapaciteti se mogu povećati za preko 40% [11].

<sup>5</sup> Prosječan automobil stvara 252 g/km CO<sub>2</sub>. Korisnici željezničkog prijevoza prosječno ostvaruju 14 putničkih kilometara. Ovim podacima se može na dnevnoj, mjesečnoj ili godišnjoj razini izračunati koliko bi se smanjila proizvodnja CO<sub>2</sub> za 375 osobnih vozila koliko zamjenjuje jedna elektro-motorna garnitura gradsko-prigradskog prometa.

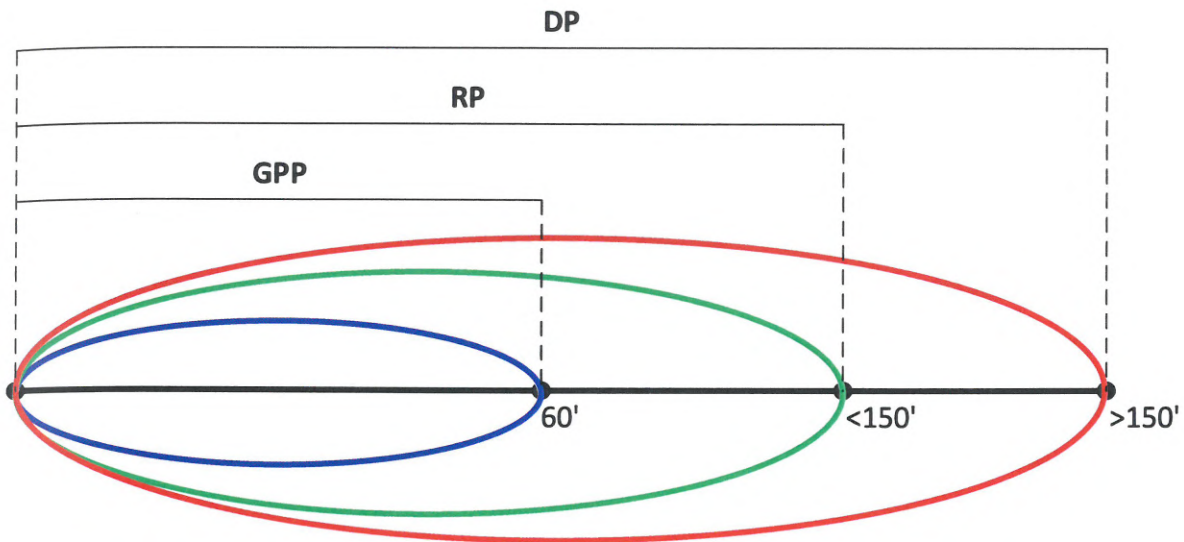
## 2.4 Optimizacija organizacije željezničkog prometa

Tokovi putnika ukazuju da se mijenjaju navike korisnika javnog prijevoza, naročito u područjima aglomeracijskih centara. Od javnog prijevoza korisnici očekuju pouzdanost, točnost i učestalost uz jedinstveni tarifni sustav svih modova prijevoza uključenim u javni prijevoz [25]. Željeznički prijevoz, kao okosnica javnog prijevoza, u tako organiziranim područjima ima potrebu organizacijskih izmjena kako bi se maksimalno iskoristili njegovi kapaciteti i prednosti. Organizacijski model koji se temelji na zakonskoj regulativi ovisi o definiranoj strukturi pravila i propisa, a njihova neprilagođenost zahtjevima korisnika se pokazuje kao smetnja prilikom izrade nekih tehnoloških rješenja za povećanje kapaciteta i iskoristivosti. Tehnološko povećanje kapaciteta i iskoristivost vlakova gradsko-prigradskog prometa moguće je povećati u nekoliko segmenata, a odnosi se na:

- podjelu putničkog prometa
- rangiranje vlakova
- uvođenje zona gradsko-prigradskog prometa.

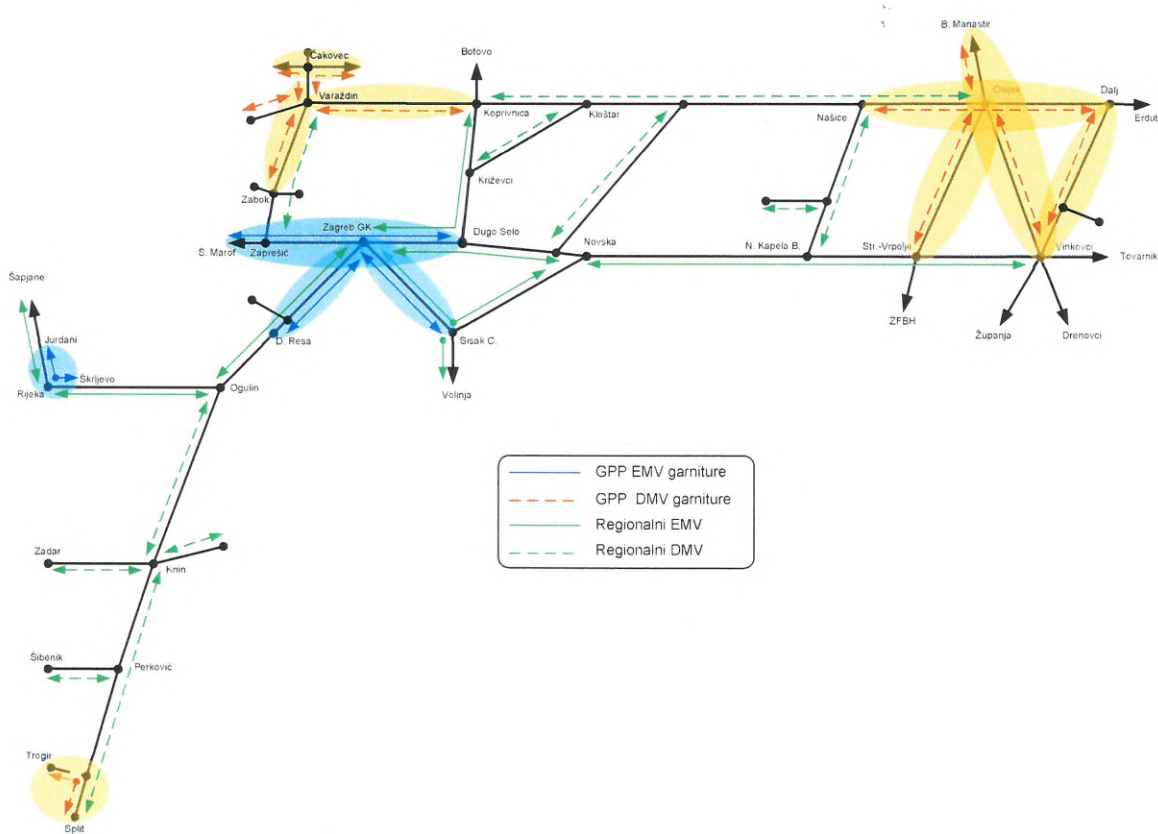
Predložena podjela putničkog prometa (Slika 13) temelji se na vremenskoj komponenti putovanja. U predloženom konceptu putnički promet se dijeli s obzirom na vremenski interval putovanja na tri vrste prometa i to:

- daljinski promet (DP) – vremenski interval putovanja  $t_p > 150'$
- regionalni promet (RP) - vremenski interval putovanja  $60' < t_p \leq 150'$
- gradsko-prigradski promet (GPP) - vremenski interval putovanja  $t_p \leq 60'$ .



Slika 13: Duljina predloženih duljina područja prometa

Na primjeru željezničke mreže HŽ-a takva podjela bi sadržavala pet gradsko-prigradskih područja [4, 5]. Vremenski interval (60 – 150 minuta) određen za regionalni promet poveznica je sa širim gravitacijskim područjem.



Slika 14: Podjela mreže na DP, RP i GPP promet (Izvor: [5])

Aglomeracijske centre gradsko-prigradskih područja povezuju vlakovi iz daljinskog prometa (Slika 14). Na taj način cjelokupna mreža funkcionira na jasnim i definiranim podjelama.

Izmijenjene karakteristike predložene podjele putničkog prometa odnose se na gradsko-prigradsko područje gdje manipulaciju ulaska/izlaska putnika na stajalištima vrše samo vlakovi GPP-a. Gradsko prigradski vlakovi u području GPP-a spadaju u kategoriju vlakova najvišeg ranga. Uključivanje daljinskih i regionalnih putničkih vlakova u GPP nije prihvatljivo zbog karakteristika njihovih garnitura. Garniture za regionalni promet, u odnosu na garniture gradsko-prigradskog prometa, imaju veći broj sjedala i manji broj ulaza/izlaza što predstavlja smetnju brzom izmjeni putnika čime se povećava bavljenje na stajalištima. U uvjetima kada ne postoji sustav informiranja putnika na stajalištima, vizualni izgled garnitura gradsko-prigradskog prometa pomaže putnicima da se na peronu pripreme za ulazak u vlak, a veći broj ulaza/izlaza na garnituri omogućava bržu izmjenu putnika što skraćuje vrijeme bavljenja na stajalištu. Potrebno vrijeme za ulaz i izlaz putnika se na taj način smanjuje s jedne minute na pola minute po stajalištu. Takve karakteristike nisu prisutne kod sastava vlakova s klasičnim vagonima ili motornih garnitura predviđenih za regionalni promet. Putnici iz daljinskih ili regionalnih vlakova kojima je određeno jedno od stajališta u zoni GPP-a imaju mogućnost presjedanja u obrtnim kolodvorima na vlakove GPP-a. Osim organizacijskih izmjena za povećanje kvalitete prijevoza potrebno je uvesti taktni vozni red. Taktni vozni red ima utjecaj na raznu uslugu (*LoS – Level of Service*) [26] zbog čega je korisnicima evidentno povećanje kvalitete usluge prema kvantitativnim varijablama:

- dostupnost usluge
- vrijeme prijevoza
- konstantnost usluge
- prihvatljiva čekanja
- sigurnost i udobnost.

Prilikom izračunavanja, parametri koji povećavaju dostupnost usluge odnose se na postotak učešća vrste vlakova u određenom promatranom vremenskom intervalu izraz (2).

$$LoS = 0,257 \cdot \exp^{-1,3 \cdot p_{pt}} \cdot t_{sched} \quad (2)$$

gdje su:

- *LoS* – razina usluge (engl. „Level of service“)
- *p<sub>pt</sub>* – postotak vrste vlakova
- *t<sub>sched</sub>* – promatrani vremenski interval.

Uvrštavanjem parametara izračunavanjem razine usluge ona postaje matematički mjerljiva komponenta putničkog prometa (Tablica 4).

Tablica 4: Razina usluge

vrsta	broj vlakova	$P_{pt}$	$t_{sched}$	LoS
<b>Brzi</b>	3	0,14	4	0,85
<b>Ubrzani/putnički</b>	7	0,33	4	0,67
<b>prigradski</b>	11	0,52	4	0,52

Analizom kašnjenja vlakova koji prometuju u jutarnjim vršnim satima opterećenja vjerojatnost kašnjenja putničkih vlakova podijeljena je prema njihovom rangu i njihovo prosječno kašnjenje grupirano je prema istim ili sličnim karakteristikama u voznom redu (Tablica 5).

Tablica 5: vjerojatnost kašnjenja putničkih vlakova (izvor: HŽ Infrastruktura)

Vrsta vlaka	Vjerojatnost kašnjenja (%)	Prosječno kašnjenje (min)
<b>brzi</b>	58	10,45
<b>ubrzani/putnički</b>	68	8,86
<b>prigradski</b>	3	1,92

*Kašnjenja prigradskih vlakova nastala su kao primarna i sekundarna kašnjenja zbog čekanja na pretjecanja vlakova višeg ranga u kašnjenju. U analiziranom vremenskom razdoblju 01.10.2020. – 31.12.2020. godine, predmet istraživanja su zakašnjenja prouzročena tehničkim nedostacima na vozilima i kašnjenja nastala utjecajem vlakova višeg ranga. Zakašnjenja prigradskih vlakova (11 vlakova u jutarnjem vršnom opterećenju) odstupaju od prosjeka iz tablice 5. Ukupna primarna i sekundarna zakašnjenja iznose 1108 minuta od čega 786 minuta pripada primarnom, a 322 minute sekundarnom kašnjenju (*

Tablica 6).

Sekundarno kašnjenje se odnosi na čekanje garniture iz obrta. Primarno kašnjenje se odnosi na čekanje na pretjecanje što iznosi 425 minuta. Prosječno kašnjenje po vlaku iznosi 38,5 minuta/vlaku, odnosno 4,7 minuta/24h.

Tablica 6: Analiza kašnjenja vlakova GPP-a za razdoblje 01.10.2020. – 31.12.2020. (Izvor: HŽ Infrastruktura)

vrsta smetnje	8004	8006	8008	8012	8014	8016	8018	8020	8022	8024	8026	Σ	%
---------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	---	---

čeka pretjecanje	6	0	0	16	135	174	5	55	10	15	9	425	38%
garnitura iz obrta	12	3	26	2	9	39	7	26	20	61	117	322	29%
promjena sastava	5	6	7	20	8	0	0	0	10	5	0	61	6%
produžena vožnja	20	22	16	20	19	35	14	9	23	23	10	211	19%
kvar	15	11	52	0	0	11	0	0	0	0	0	89	8%
<b>ukupno po vlaku</b>	<b>58</b>	<b>42</b>	<b>101</b>	<b>58</b>	<b>171</b>	<b>259</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>63</b>	<b>104</b>	<b>136</b>	<b>1108</b>	

primarno kašnjenje: 786

sekundarno kašnjenje: 322

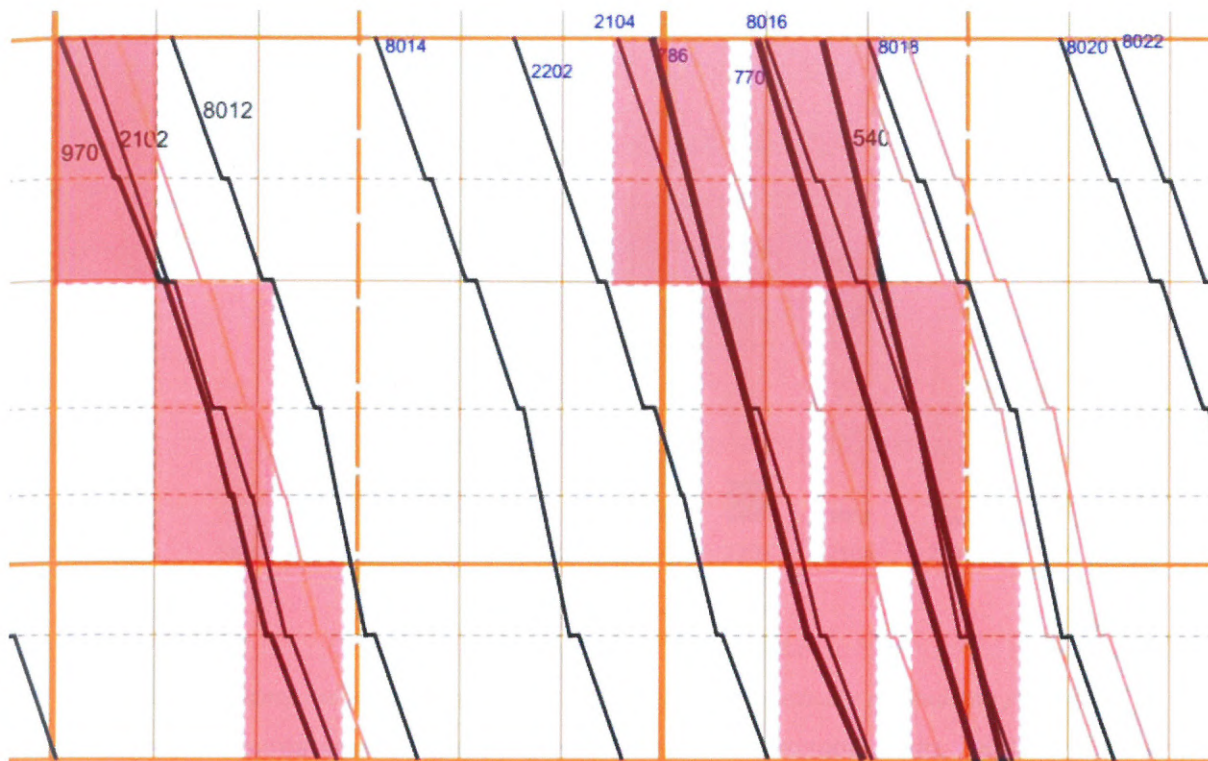
Predložena organizacija prometa se odnosi na prigradske vlakove koji bi imali prednost ispred svih vlakova u području prigradskog prometa. Na taj način bi se utjecaj vlakova iz daljinskog i regionalnog prijevoza na stabilnost voznog reda gradsko-prigradskih vlakova smanjila za 67% (Slika 15). Analizirana dionica je pruga iz realnog okruženja na relaciji Dugo Selo – Zagreb GK.



Slika 15: Uzroci kašnjenja vlakova GPP-a

Nestabilnost voznog reda nastaje kao posljedica velike vjerojatnosti kašnjenja vlakova višeg ranga.

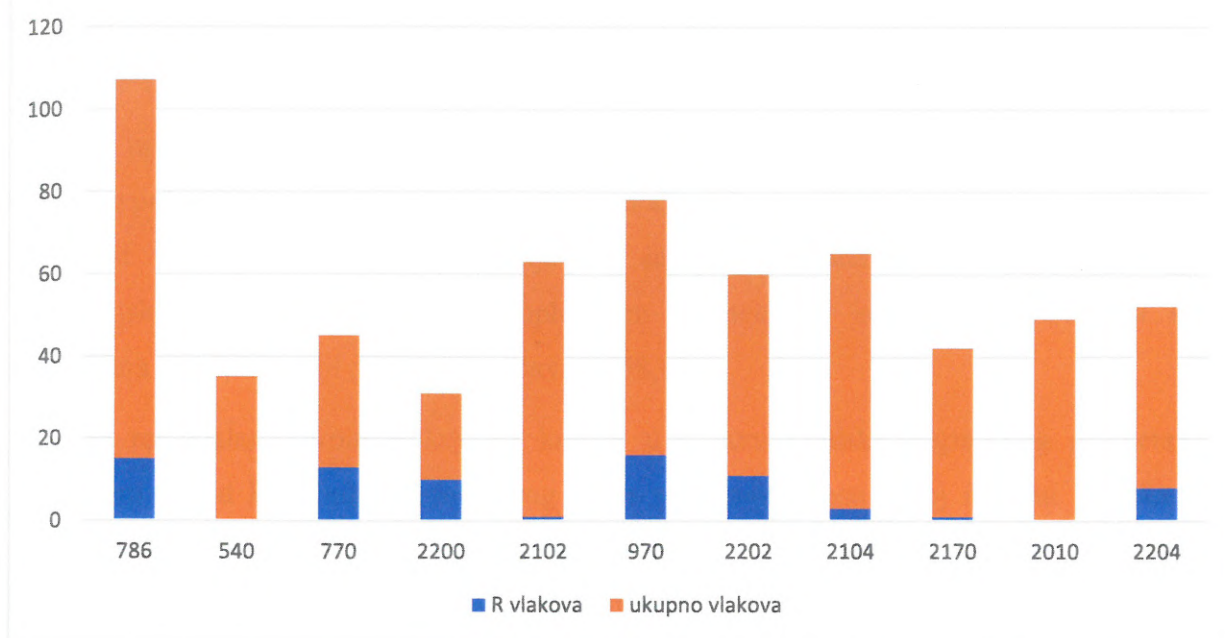
Na temelju prosjeka zakašnjenja prema vrsti vlaka i vjerojatnosti da će biti zakašnjeli, grafički je prikazan njihov utjecaj na vlakove nižeg ranga (Slika 16). Crveno označeni pravokutnici na slici označavaju vremensko zauzeće pruge između dva službena mjesta po blokovnim odsjecima kada vlak višeg ranga kasni te ni jedan vlak nižeg ranga ne može prometovati nego akumulira zakašnjenje.



*Slika 16: Utjecaj na stabilnost voznog reda vlakova u zakašnjenju*

S obzirom na postotak broja vlakova koji se pojavljuju u jutarnjim satima vršnog opterećenja i analizu vjerojatnosti njihovog kašnjenja koje nastaje u izvršenju voznog reda, potrebno je optimizirati i smanjiti njihov međusobni utjecaj na stabilnost voznog reda.

Velika vjerojatnost pojave kašnjenja odnosi se na vlakove koji ulaze u područje prigradskih vlakova (Slika 17). To su IC, EC, brzi, ubrzani i putnički vlakovi s dugim relacijama prometovanja.



Slika 17: Odnos redovitosti i kašnjenja vlakova koji ulaze u područje prigradskog prometa

Prema satima u kojima se pojavljuju prema predviđenom voznom redu, Tablica 7 prikazuje odnos vrsta vlakova u vršnim satima opterećenja i njihovo pojavljivanje prema predloženom modelu. U tablici je uspoređena studija slučaja i istraživanog modela s predloženom organizacijom prometa i uvedenim taktim voznim redom.

Tablica 7: Pojava vlakova prema vrsti u satnim intervalima

vrsta vlaka	5	6	7	8	9
IC/EC	0	1	0	0	2
brzi	0	1	1	0	1
ubrzani	1	0	0	0	0
putnički	2	1	1	2	0
prigradski	3	2	4	2	1
studija slučaja	6	5	6	4	4
DP	0	2	1	0	2
RP	3	2	1	2	0
GPP	3	3	3	3	3
istraživani model	6	7	5	5	5

Praćenje tokova putnika služi kao smjernica u razvoju i unapređenju željezničkog prometa. Rezultati pokazatelja tokova putnika usmjeravaju prioritet razvoja u smjeru gradsko-prigradskog prometa. Navedeno se odnosi na pruge s mješovitom prometom, kako na prugama HŽ-a tako i na prugama željeznica u okruženju. Organiziranjem prometa drugačije od trenutno propisanih postupaka, a koji ne utječu na sigurnost željezničkog prometa nego na organizacijske



aspekte, omogućava se tehnološko unapređenje organizacije prometa s ciljem stabilnosti i sigurnosti prijevoza te povećanje razine usluge prilagođene zahtjevima korisnika.

Ukoliko upravitelj infrastrukture vrši redovito i kvalitetno održavanje pruge, a maksimalne brzine su približno jednake projektiranim brzinama, uvođenje taktnog voznog reda ne utječe na stabilnost voznog reda. Kapacitet prijevoza se, prema matematičkim proračunima za simulacijski model na dionici s kompleksnim prometom i istim karakteristikama kao analizirana pruga u studiji slučaja, povećava za 58,8%.

Vlakovi regionalnog prometa koji se koriste u dopuni gradsko-prigradskog prometa, a sastavljeni su od klasičnih vagona, zbog svoje neprilagođenosti brzoj izmjeni putnika na stajalištu imaju bavljenje od jedne minute po stajalištu. Tipski vlakovi u gradsko-prigradskom prometu skraćuju i vrijeme bavljenja na stajalištima za ulaz i izlaz putnika te ovo vrijeme iznosi 0,5 minuta po stajalištu. Bez obzira što koriste maksimalnu brzinu na pruži, kod više od jednog stajališta na promatranoj dionici njima se povećava vrijeme vožnje između dva kolodvora više nego vlakovima sastavljenim od tipskih garnitura (Tablica 8). Prema studiji slučaja maksimalne brzine vlakova su: 140 km/h za vlakove DP-a i RP-a te 120 km/h za vlakove GPP-a. Uzimajući u obzir akceleracijske karakteristike vozila na primjeru dvije dionice duljina 10200 m i 10600 m, čistom vremenu vožnje se dodaju vremena usporenja i ubrzanja ovisno o broju stajališta na promatranoj dionici. Izračuni pokazuju da su rezultati povoljniji kod tipskih garnitura kada postoji više stajališta. U studiji slučaja, u području aglomeracijskog centra na dionici između dva kolodvora se nalaze tri stajališta što znači da tipske garniture GPP vlakova, iako su im maksimalne brzine niže od vlakova RP-a, imaju kraće vrijeme vožnje. Prema rezultatima proračuna, komercijalna brzina GPP vlakova je veća bez obzira na njihovu manju maksimalnu brzinu.

*Tablica 8: Vremena vožnje između dionica s obzirom na broj stajališta*

<b>vrsta vlaka</b>	<b>DP/RP</b>	<b>GPP</b>	<b>DP/RP2</b>	<b>GPP3</b>
<b>duljina dionice (m)</b>	<b>10200</b>		<b>10600</b>	
<b>t vožnje</b>	4,6	5,4	5,1	5,6
<b>t+1 stajalište</b>	5,4	6,3	6,7	6,5
<b>t+2 stajališta</b>	6,2	7,1	8,3	7,3
<b>t+3 stajališta</b>	6,9	8,0	9,8	8,2
<b>t+4 stajališta</b>	7,7	8,8	11,4	9,0

Ovakav pristup omogućava povećanje razine kvalitete usluge svih rangova vlakova u putničkom prometu. Rezultati su prikaz izračuna za vremenski interval od četiri sata jutarnjeg vršnog opterećenja, za tri kategorije putničkih vlakova, a teretni vlakovi su zbog mogućnosti dislokacije trase predviđene voznim redom u ovom slučaju irelevantni (Tablica 9).

Tablica 9: Kvaliteta usluge predložene organizacije putničkog prometa („LoS“)

vrsta	broj vlakova	$P_{pt}$	$t_{sched}$	LoS
<b>DP</b>	3	0,09	4	0,92
<b>RP</b>	7	0,20	4	0,79
<b>GPP</b>	25	0,71	4	0,41

U organizacijskom smislu, određivanjem postupaka kod kojih vlakovi GPP-a imaju prednost pri otpremi iz obrtnih kolodvora, kada se pojavi odstupanje od voznog reda vlakova višeg ranga, smanjuje se utjecaj tranzitnih vlakova na vlakove s polaskom iz obrtnog kolodvora te se smanjuje primarno i sekundarno kašnjenje vlakova GPP-a, koje prema analizi provedenoj u vremenskom razdoblju od tri mjeseca, iznosi 67% njihovog analiziranog kašnjenja.

## 3 Tehnološki kriteriji stabilnosti voznog reda

### 3.1 Elementi voznog reda

„Vozni red je temeljni plan tehnološkog procesa željezničkog prometa koji se izrađuje na osnovi istraživanja i utvrđivanja veličina putničkih i teretnih tokova u ovisnosti o raspoloživim sredstvima željeznice.“<sup>6</sup> Vozni red se sastoji od postojećih tehničkih i tehnoloških kapaciteta prema kojima se određuju pojedini elementi. Izrađuje se za razdoblje od jedne kalendarske godine i može biti opći, koji određuje broj redovitih vlakova i vlakova po potrebi u razdoblju za koji izrađuje, te posebni, koji se izrađuje za vlakove za koje se ne može izraditi unaprijed u općem voznom redu ili se izrađuje prema naknadnom, izvanrednom, zahtjevu prijevoznika.

Materijali općeg voznog reda koji se objavljuju su:

- grafikon voznog reda (Slika 18)
- priručnik o željezničkim prugama
- knjižica voznog reda (Slika 19)
- izvadci voznog reda (Slika 20)
- prijelazna zapovijed.

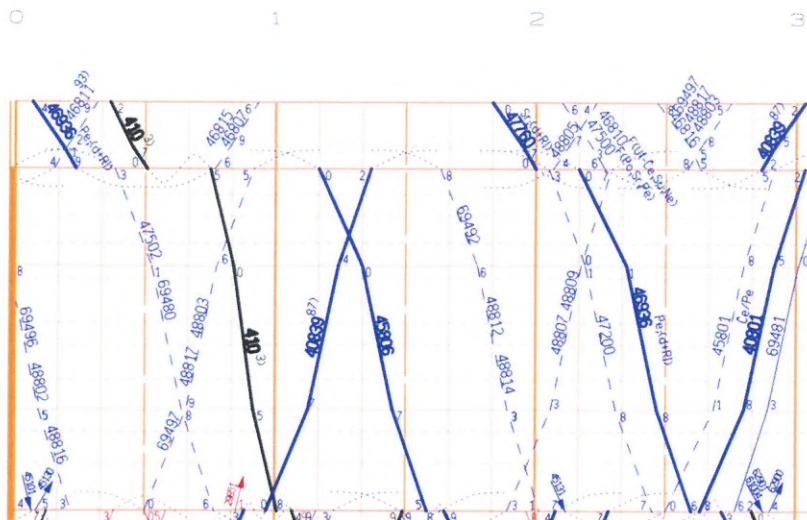
Izradi voznog reda prethodi Izvješće o mreži koje se objavljuje u tekućoj za narednu godinu i služi kao temelj za pregled infrastrukturnih kapaciteta.

Grafički prikaz voznog reda je vremensko-prostorna projekcija planiranih vlakova kroz 24 sata i iscrtava se za svaku prugu posebno. Ordinata u grafičkom prikazu je prostorna, dok je apscisa vremenska os. Vrsta vlaka je određena bojom i vrstom linije. Vremenska podjela je označena svakih 10 minuta, a broj u vremenskoj liniji označava jediničnu vremensku vrijednost koja se dodaje sjecištu linije vlaka i dekadskoj vremenskoj osi.

---

<sup>6</sup> Mlinarić T.J.: „Osnove tehnologije željezničkog prometa“; str. 110.

- 114 ● SID (ZS)
- 115 ● TOVARNIK
- 116 ● VINKOVCI



Slika 18: Grafikon prometa vlakova (Izvor: HŽ Infrastruktura)

Knjižica voznog reda je plan rada vlaka za strojovođu i pokazatelj: vremenskih intervala prometovanja, maksimalno dozvoljenih brzina na relaciji prometovanja, sastava vlaka, postotka kočjenja, duljine i mase vlaka te prostornih oznaka specifičnih mjesta na infrastrukturi (Slika 19).

1 HŽ PP  
VINKOVCI – ZAGREB GL. KOL. – DOBOVA  
R p=139% SVV:1 142 Q=400t SV Sa  
R od 11.VII.

KM. POLOŽAJ	SLUŽBENA MJESTA	BRZINA		VRIJEME		SASTAJANJA	
		PREKO SKRETNICA		DOLASKA	ODLASKA		
		RED.	OGR.				
1	2	3	4	5	6	7	8
210							
155.9	VINKOVCI		20	50		8.53	
	RD A-66; AS						
	km 156+840			160			
	km 166+211			100			
166.7	IVANKOVO		40			8.59	
	km 167+250			120			
	km 175+827			100			
177.0	STARI MIKANOVC		50			9.05	
	km 178+241			120			
	km 186+879			100			
187.8	STRIZ. - VRPOLJE		40		9.11	9.12	

Slika 19: Prikaz voznog reda vlaka 210 u knjižici voznog reda (Izvor: HŽ Infrastruktura)

Izvadak voznog reda prvenstveno služi korisnicima prijevoza i sadrži osnovne podatke o vlakovima (vrstu vlaka, relaciju putovanja, sastav vlaka, kolosijek s kojeg polazi, vrijeme dolaska/odlaska) te može biti u papirnatom ili elektroničkom obliku (Slika 20).

**VOZNI RED****B. JARUGA – DARUVAR – VIROVITICA**

VRIJEDI OD 13.12.2020. DO 11.12.2021.

Veza iz smjera Zagreb GK / Vinkovci											
Broj vlaka:	541 B	542 B	2011 P	2012 P	413 B	544 IC	543 IC x	544 IC	211/211 B	1951 P	
Polazak iz:	Zagreb 06.12	Vinkovci 06.39	Zagreb 07.37	Vinkovci 06.39	Zagreb 11.04	Vinkovci 11.40	Zagreb 13.04	Vinkovci 17.10	Zagreb 17.42	Zagreb 18.19	
Dolazak u B. Jarugu	Kutina 07.39	Novska 07.27	Kutina 09.25	Novska 09.23	Kutina 12.29	Novska 13.20	Kutina 14.35	Novska 19.11	Kutina 19.09	Kutina 20.02	
	07.47	09.41	09.34	09.40	12.37	13.36	14.44	18.34	19.17	20.11	
BROJ VLAKA											
STAJALIŠTE KOLODVOR	2450 VLAK 1	2452 VLAK 2	2454 VLAK 3	2456 VLAK 4	2410 VLAK 5	1951 VLAK 6					
BANOVA JARUGA	07.52	11.25	12.56	15.55	19.44	20.13					
Međurić	07.56	11.29	13.00	15.59	19.48	20.17					
Poljana	08.04	11.37	13.08	16.07	19.56	20.25					
Brezine-Bujavica	08.11	11.44	13.15	16.14	20.03	20.32					
Kukunjevac	08.17	11.50	13.21	16.20	20.09	20.38					
Dobrovac	08.24	11.57	13.28	16.27	20.16	20.45					
Lipik	08.30	12.03	13.34	16.33	20.22	20.52					
Pakrac Grad	08.37	12.10	13.41	16.40	20.29	20.59					
Pakrac	08.39	12.12	13.43	16.42	20.31	21.01					
Badjevin	08.54	12.27	13.58	16.57	20.46	21.16					
Sirač	09.07	12.40	14.11	17.10	20.59	21.29					
Bijela	09.15	12.48	14.19	17.18	21.07	21.37					
DARUVAR dolazak	09.24	12.57	14.28	17.27	21.16	21.46					

Slika 20: Izvadak iz voznog reda (Izvor: HŽ Infrastruktura)

Prijelazne i završne odredbe su interni akt HŽ Infrastrukture te služe kao naputak izvršnom osoblju u kolodvorima o postupcima s vlakovima tijekom promjene voznog reda.

Svi materijali voznog reda sadrže elemente koji su relevantni za njegovo provođenje.

Elementi koji se odnose na vozni red putničkih vlakova su:

- Vremensko razdoblje valjanosti voznog reda
- broj vlaka
- sastavi planiranih vlakova prema dodijeljenim trasama
- vrsta vučnog vozila
- vozno vrijeme vlaka određeno tehničkim parametrima vlaka i pruge
- maksimalne brzine vlaka
- kolodvorski intervali
- intervali slijeđenja vlakova
- predviđena križanja vlakova u kolodvorima na jednokolosiječnim prugama određena rangom vlakova
- tehnološka vremena stajanja u službenim mjestima potrebna za manipulaciju putnicima
- kilometarski položaji službenih mjesta i mjesta smanjenih maksimalnih brzina trajne vrijednosti
- kolodvorski kolosijeci za redovni prijem vlakova

- sastav vlakopratnje (SV – vučno vozilo zaposjednuto samo strojovođom, SV+1 – vučno vozilo zaposjednuto strojovođom i pomoćnikom strojovođe, VV – vlak prati vlakovođa, Kdk – vlak prati kondukter, Mv – vlak prati manevrist na vlaku, Bez – vlak bez vlakopratnog osoblja)
- kalendar prometovanja vlaka
- duljina vlaka
- planirana masa vlaka
- postotak kočenja
- tehnička opremljenost pruge (TK – telekomanda, APB – automatski pružni blok, MO – međukolodvorska ovisnost, OP – obostrani promet, RD – radio dispečerska veza, AS – autostop uređaj, TO – telefonski ormarić, vrste ŽCP – željezničkog cestovnog prijelaza)
- plan rada i sastava vlaka te podjela manevarskog rada.

Vremensko razdoblje valjanosti voznog reda određuje točan vremenski početak i kraj važenja voznog reda.

Broj vlaka definira rang i karakteristike vlaka s obzirom na relaciju putovanja.

Sastav vlaka je izrađen prema postojećim kapacitetima prijevoznika i određuje se prema analizi tokova putnika i ugovorima u međunarodnom prometu.

Vrsta vučnog vozila se određuje za sve planirane vlakove na mreži prema broju lokomotiva kojima raspolaže prijevoznik, a prema vučnim sektorima određuje obrt lokomotiva.

Vozno vrijeme vlaka ovisi o vrsti vlaka, maksimalnim brzinama vlaka na pruzi s uključenim svim stajanjima zbog manipulacije putnicima u službenim mjestima koja su otvorena za putnički promet.

Maksimalne brzine vlaka ne mogu biti veće od maksimalno dozvoljenih brzina na pruzi i jedne su od komponenti određivanja vrste vlaka.

Kolodvorski intervali su određeni za svaki kolodvor. Za organizaciju prometa u kolodvoru mora se izračunati svaki od 10 kolodvorskih intervala koji su određeni za promatrani kolodvor. Kolodvorski intervali su: interval neistodobnog dolaska vlakova, interval križanja, interval uzastopnog slijeđenja, interval neistodobnog odlaska i dolaska vlakova, interval neistodobnog odlaska vlakova, interval neistodobnog ulaska vlakova, interval neistodobnog dolaska i odlaska vlakova, interval neistodobno prelaska vlakova, interval neistodobnog prelaska vlakova na raskrižjima i interval neistodobnog prelaska vlakova na križanjima.

Intervali slijeđenja vlakova ovise o načinu osiguranja prometa između dva kolodvora i mogu biti: međukolodvorski, blokovni/odjavni ili intervali APB-a (automatskog pružnog bloka).

Razlikuju se intervali na jednokolosiječnim i dvokolosiječnim prugama.

Predviđena križanja vlakova na jednokolosiječnim prugama su određena vremenskim bavljenjem u kolodvoru vlakova koji čekaju prolazak vlaka iz suprotnog smjera.

Tehnološka vremena u kolodvorima i službenim mjestima ovise o broju putnika kod njihovog ulaska /izlaska te u situacijama kada se čeka veza drugog vlaka.

Kilometarski položaj službenog mjesta ili početka smanjene redovne brzine omogućavaju strojovođi pravovremeno poduzimanje mjera za smanjenje brzine vlaka s prihvatljivim parametrima usporenja prilikom prijevoza putnika.

Prilikom donošenja novog voznog reda za svaki kolodvor se određuje kolosijek za redoviti prijem i otpremu svakog vlaka koji redovito prometuje.

Sastav vlakoprati određuje službeno osoblje vlaka koje mora biti prisutno na vlaku tijekom prometovanja.

Kalendar prometovanja vlakova određuje ima li vlak redovitu trasu ili trasu po potrebi. Svaki vlak koji prometuje najmanje pet dana u tjednu smatra se redovitim vlakom.

Duljina vlaka se određuje s obzirom na raspoloživost prijevoznih sredstava prijevoznika i tehničke karakteristike vučnog vozila, a ne može biti veća od najveće dopuštene duljine vlaka na predmetnoj dionici koja je određena najkraćim glavnim prolaznim kolosijekom jednog od kolodvora.

Planirana masa vlaka je maksimalna masa vučenih vozila koja omogućava održavanje maksimalnih brzina vlaka s obzirom na tehničke karakteristike vučnog vozila.

Postotak kočenja je određen najnepovoljnijom dionicom na relaciji putovanja gdje mora biti u mogućnosti prilikom kočenja stati unutar određene duljine zaustavnog puta. Duljina zaustavnog puta ovisna je o maksimalnim brzinama na pruzi.

Tehnička opremljenost pruge omogućava iskorištenje infrastrukture s obzirom na vrstu signalno-sigurnosnih i upravljačkih uređaja na pruzi.

Plan rada vlaka i podjela manevarskog rada određuje kolodvore u kojima se vrše manevarske radnje na vlaku i način na koji se iste obavljaju.

Kvaliteta usluge prijevoza putnika se odražava na vozni red, a definirana je slijedećim obilježjima:

- ukupno vrijeme putovanja i brzina prijevoza,
- pouzdanost voznog reda (redovitost i točnost),
- frekvencija polazaka,
- sigurnost prijevoza,
- udobnost u kolodvorima i vlakovima,
- pristupačnost kolodvorima i stajalištima,

- usklađenost s ostalim modovima prometa,
- odnos osoblja prema putnicima,
- dodatne usluge u vlakovima i kolodvorima,
- informiranost putnika.

U ovom radu optimizacija se odnosi na stabilnost voznog reda s naglaskom na utjecaj vlakova višeg ranga na vlakove nižeg ranga u području gradsko-prigradskog prometa. Elementi voznog reda koji se analiziraju su vremenske komponente putovanja i vremena slijeđenja vlakova. Vrijeme vožnje između dva službena mjesta na pruzi ovisi o maksimalnoj brzini vlaka, eventualnim zaustavljanjima i njihovom broju te usporenim vožnjama trajnijeg važenja. Eventualna zaustavljanja se odnose na mjesta na kojima se obavlja manipulacija putnicima (ulaz/izlaz). Usporene vožnje trajnijeg značenja uvode se zbog stanja infrastrukture i usko su povezana s kvalitetom održavanja. Ukoliko se usporenja privremenog ili trajnijeg značenja uvode nakon početka primjene voznog reda dolazi do nestabilnosti voznog reda. Smanjuje se komercijalna brzina vlakova i propusnost pruge, produžuje se ukupno vrijeme putovanja i povećava se broj vlakova koji kasne što dovodi do narušavanja kvalitete prijevoza.

### **3.2 Propusnost i kapacitet pruge**

Kapacitet pruge predstavlja maksimalni broj vožnji vlakova koji se mogu ostvariti na nekoj dionici pruge izražen kao propusna i prijevozna moć pruge.

Prijevozna moć pruge predstavlja maksimalni teoretski kapacitet prevezenog tereta i putnika s obzirom na tehnička i tehnološka ograničenja najnepovoljnije dionice pruge. Propusna moć pruge mjeri se maksimalnim brojem vlakova u jedinici vremena. Broj vlakova je promjenjiva varijabla s vršnim prometnim intervalima koji se događaju, u pravilu, dva puta dnevno u jutarnjem i popodnevnom intervalu. U tim radzobljima dio vlakova koji sudjeluju u izračunu propusnosti su vlakovi GPP-a koji imaju bavljenje na stajalištima, a s obzirom na maksimalnu dozvoljenu brzinu od 120 km/h, njihova je prosječna brzina 75 – 77 km/h, ovisno o vrsti garnitura u sastavu<sup>7</sup>. Putnički vlakovi najvišeg ranga prometuju bez međukolodvorskog zadržavanja i maksimalno dozvoljenom brzinom te je njihova prosječna brzina na promatranoj dionici jednaka maksimalnoj brzini. S obzirom na različite prosječne brzine različit je i broj vlakova koji mogu proći dionicom u vremenskom intervalu od 60 minuta.

<sup>7</sup> Elektromotorne garniture serije 6112 (niskopodne) novije su proizvodnje te imaju kraći vremenski interval za usporenje od elektromotornih garnitura starije proizvodnje serije 6111



Izračunavanje propusne moći pruge može se izvršiti pomoću metoda [27]:

- razdoblja grafikona i mjerodavnih intervala slijeđenja vlakova
- proračuna pomoću srednjeg slobodnog intervala između vlakova
- eksponencijalne raspodjele slobodnih vremena
- faktora korelacije
- po preporuci UIC-a (UIC 405 i UIC 406).

Navedene metode se dijele na one metode koje su:

- zavisne od voznog reda
- nezavisne od voznog reda.

Razlika između metoda izračuna intervala zavisnog i nezavisnog od voznog reda je u tome što se kod metode nezavisne od voznog reda moraju izračunati sve moguće situacije slijeđenja vlakova, dok su kod metode zavisne od voznog reda poznate situacije slijeđenja vlakova.

Metode za utvrđivanje kapaciteta pruge [28] mogu se podijeliti i na:

- analitičku metodu,
- optimizacijsku metodu i
- simulacijsku metodu.

Analitička metoda je veoma osjetljiva na izbor parametara i intervala slijeđenja vlakova različitih vremenskih kategorija putovanja.

Optimizacijska metoda rješava problem željezničkih kapaciteta i daje mnogo bolja rješenja od izvedenih analitičkih formula. Izračunava se kombinacijom izračuna cjelobrojnim linearnim programiranjem i numeričkom analizom [29]. Optimizacijska metoda određivanja kapaciteta se bazira na optimalnosti zasićenja voznog reda.

Simulacijska metoda je simulacija izvedenih operacija s vlakovima u stvarnim uvjetima prema konstrukciji „što ako“. Simulacijske metode se opisuju i upotrebljavaju od 80-ih godina prošlog stoljeća. U metodi simulacije i optimizacije koju je razvio Kaas 1991. godine pod imenom „Strategic Capacity Analysis for Network – SCAN“ [30], a koja se javlja u radu autora Jovanović i Harker 1991. godine [31], definiraju se čimbenici na različitim razinama detalja koji zajedno određuju kapacitet mreže.

„OpenTrack“ – (OpenTrack Railway Technology) je simulacijski alat koji izračunava kretanje vlakova s obzirom na signalno-sigurnosne sustave i elemente voznog reda, a isto tako simulacijom konstrukcije „što ako“ generira njegov utjecaj na ostale vlakove [32].

Iz navedenih metoda proizlazi zaključak da se samo upotrebom sve tri metode: analizom, optimizacijom i simulacijom, mogu postići optimalni rezultati na način da se u prvoj fazi analitičkom metodom odrede podaci koji će se koristiti u optimizacijskoj metodi. U drugoj fazi se optimiziraju pojedinačne akcije u cjelokupnoj organizaciji prometa. U trećoj fazi se metodom simulacije odabire optimalna metoda u uvjetima stvarnih situacija s mogućim planiranim i neplaniranim odstupanjima od voznog reda, a kriterij je maksimalni broj vlakova koji se mogu propustiti u jedinici vremena.

Izraz (3) za izračunavanje kapaciteta određene dionice [33] zavisnog od voznog reda i upotrebljavan po preporuci UIC-a glasi:

$$N = \frac{T}{t_{sm} + t_r + t_d} [\text{vlakova}] \quad (3)$$

gdje su:

$N$  – kapacitet dionice (broj vlakova)

$T$  – vrijeme za koje se računa kapacitet dionice (minuta)

$t_{sm}$  – prosječno vrijeme minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova (minuta/vlak)

$t_r$  – vrijeme rezerve, tolerancija (minuta/vlak)

$t_d$  – dodatna vremena (minuta/vlak).

Za izračunavanje vremena prosječnog minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova  $t_{sm}$  na dvokolosiječnim prugama za jednosmjerni promet koristi se izraz (4):

$$t_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} n_i \cdot t_{si} + \sum_{j=1}^{n_u} n_j \cdot t_{sj}}{\sum n_{ij}} [\text{min/vlak}] \quad (4)$$

gdje su:

$t_{sm}$  – prosječni minimalni interval slijeđenja

$n_i$  – broj slučajeva uzastopno slijeđenih vlakova prema kategoriji  $i$

$n_j$  – broj slučajeva uzastopno slijeđenih vlakova prema kategoriji  $j$

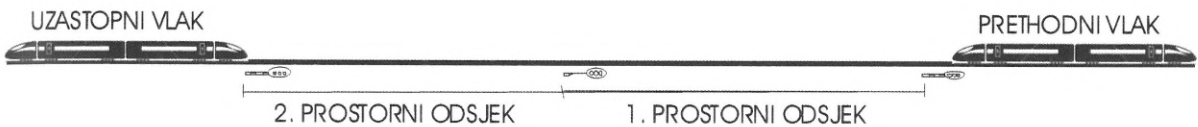
$t_{si}$  – intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova između dviju kategorija voznih vremena

$t_{sj}$  – intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova između dviju kategorija voznih vremena

$n_p$  – broj prethodnih vlakova

$n_u$  – broj uzastopnih vlakova.

Interval minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova mora biti takav da prethodni i uzastopni vlak prometuju maksimalnom brzinom što znači da između njih moraju biti dva slobodna prostorna odsjeka (Slika 21).



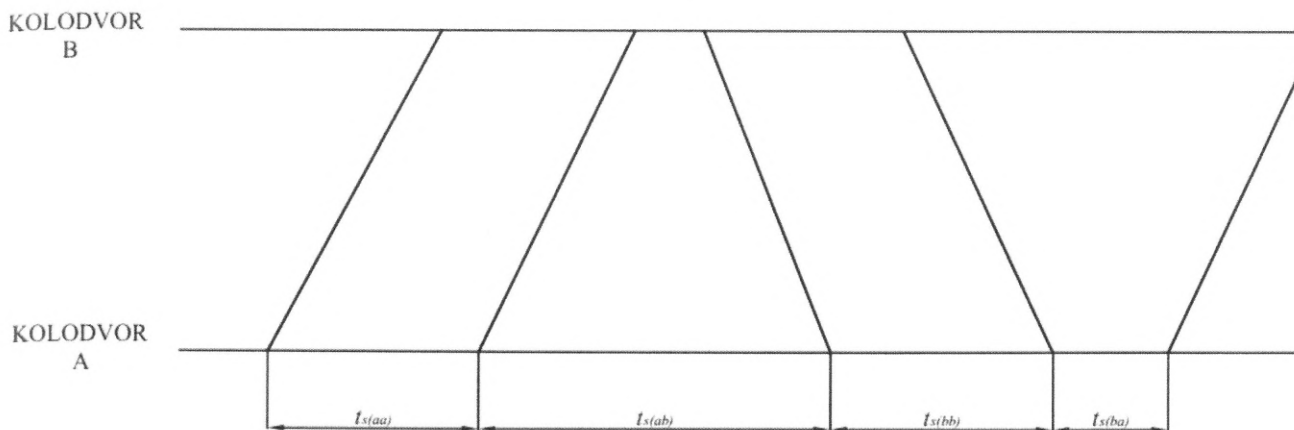
Slika 21: Primjer minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova bez ograničenja

Za izračunavanje prosječnog vremena minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova na jednokolosiječnim prugama za dvosmjerni promet (Slika 22) koristi se izraz (5):

$$t_{sm} = \frac{\sum n_{ij}(AA) \cdot t_{s(ij)}(AA) + \sum n_{ij}(AB) \cdot t_{s(ij)}(AB) + \sum n_{ij}(BB) \cdot t_{s(ij)}(BB) + \sum n_{ij}(BA) \cdot t_{s(ij)}(BA)}{\sum n_{ij}} \quad (5)$$

gdje su:

- $t_{sm}$  – vrijeme minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova
- $n_{ij}$  – broj slučajeva uzastopno slijeđenih vlakova prema kategoriji  $ij$
- $t_{sij}$  – intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova između dviju kategorija voznih vremena.



Slika 22: Intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova na prugama s dvosmjernim prometom

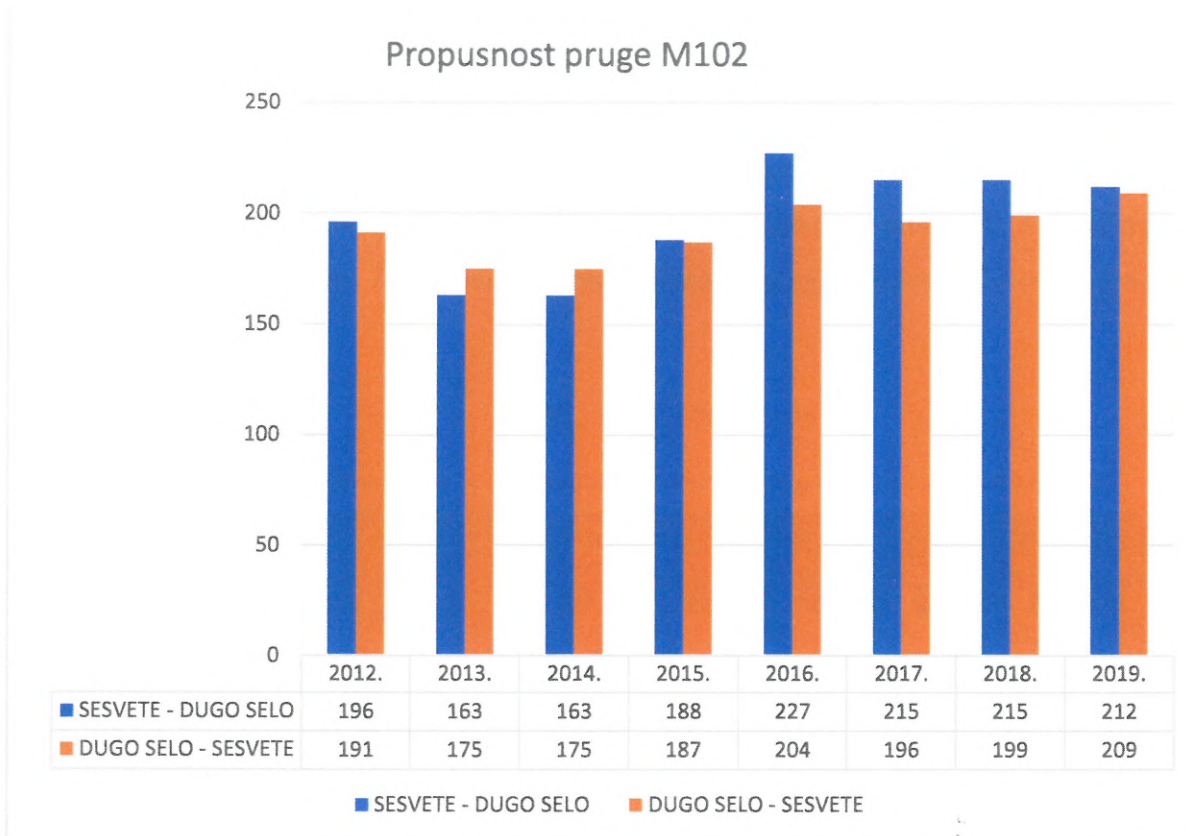
Prosječan vremenski interval minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova je varijabla koja je promjenjiva s obzirom na odnos stanja infrastrukture i važeće maksimalne brzine.

Međutim, je li izračun propusnosti pruge vjerodostojan ukoliko nisu u obzir uzeti svi parametri i stvarno stanje na promatranoj pruzi? Primjer: je li na pruzi M102 za izračun korištena najnepovoljnija dionica (radi se o dionici Dugo Selo – Sesvete)? Pitanje se postavlja zbog toga što je iduća dionica Sesvete – Zagreb Borongaj, a u kolodvoru Zagreb Borongaj nije moguće pretjecanje vlakova. Iako na toj dionici prometuje manje vlakova jer teretni vlakovi prometuju obilaznim prugama, dionica je dulja od najnepovoljnije i duža su vremena putovanja putničkih vlakova zbog broja stajališta koja se nalaze na dionici (tri stajališta: Čulinec, Trnava, Maksimir).

Može li se zbog navedenog, kao najnepovoljnija, može uzeti dionica Sesvete – Zagreb GK?

Na relaciji Dugo Selo – Sesvete, duljine 10.200 m, vrijeme vožnje iznosi 9 minuta, a na relaciji Sesvete – Zagreb GK, duljine 10.600 m, iznosi 15 minuta. Osnovni parametri prilikom izračuna, izračunavanje kritične dionice između dva kolodvora u kojima je moguće pretjecanje vlakova, nisu zadovoljeni. Kolodvor Zagreb Borongaj nema mogućnost pretjecanja vlakova bez presijecanja puta vožnje vlakovima suprotnog smjera, zbog čega bi kao promatranu dionicu trebalo odrediti dionicu Sesvete – Zagreb GK.

Maksimalni kapacitet kod propusnosti pruge je određen s obzirom na projektiranu brzinu. Sama propusnost pruge izračunata prema određenim parametrima tijekom godina eksploatacije prikazuje kvalitetu tekućeg održavanja (Slika 23).



*Slika 23: Propusnost pruge u razdoblju 2012. – 2019. godine (Izvor: HŽ Infrastruktura)*

Osnovna obilježja trase na navedenoj relaciji su:

- dvokolosiječna pruga koja na cijeloj duljini ima uzdužni nagib do 5 mm/m i vodoravnu geometriju
- brzine do 140 km/h, s iznimkom pojedinačnih lukova koji ograničavaju brzinu, i to u kolodvoru Zagreb GK na 50 km/h, a na ulazu u kolodvor Sesvete na 60 km/h.
- zaustavni put na pruzi iznosi 700 m (Zagreb Borongaj – Zagreb GK), odnosno 1000 m (Zagreb Borongaj – Dugo Selo)
- kolodvori: Zagreb Glavni kolodvor, Zagreb Borongaj, Sesvete i Dugo Selo.
- stajališta: Sesevetski Kraljevec, Čulinec, Trnava, Maksimir.

### 3.3 Prijevozni kapaciteti taktog voznog reda

Ovisno o određenom taktu u taktom voznom redu, parametri koji su bitni za određivanje potrebnog broja garnitura su:

- kilometarska duljina relacije,
- broj trasa vlakova na promatranom dionici,

- kapacitet prijevozne jedinice i
- koeficijent iskorištenosti.

Prilikom simulacijskog izračunavanja broja potrebnih garnitura u taktom voznom redu korišten je izraz (6) te su rezultati dobivenih parametara prikazani u tablici 10. Kao referentna dionica korištena je dionica Dugo Selo – Savski Marof kao najopterećenija dionica gradsko-prigradskog prometa<sup>8</sup>.

$$Nl_z = \frac{\sum Al}{\gamma_v a_{\overline{v}}^{\overline{r}}} [vlakova] \quad (6)$$

Tablica 10: Izračun parametara za utvrđivanje potrebnog broja garnitura u taktom prometu

relacija	km	interval (h)	Takt (10min)	broj trasa	$vl_z$ (10)	Takt (9min)	broj trasa2	$Nl_z$ (9)	Takt (8min)	broj trasa3	$Nl_z$ (8)	Takt (7min)	broj trasa4	$Nl_z$ (7)	broj jedinica	Ukupno mjesto	Koeficijent iskorištenosti	stvarno traženo	
Zagreb GK - Sesvete	11,7	24	10	145	3,7	9	161	4,1	8	181	4,6	7	207	5,3	189	271	460	1,00	1697
Zagreb GK - Dugo Selo	21	24	20	73	3,7	18	81	4,1	16	91	4,7	14	104	5,3	189	271	460	0,89	1533
Zagreb GK - Zaprešić	15,2	24	10	145	4,8	9	161	5,3	8	181	6,0	7	207	6,8	189	271	460	1,00	2204
Zagreb GK - S. Marof	21,7	24	20	73	4,0	18	81	4,4	16	91	5,0	14	104	5,7	189	271	460	0,87	1584
Sesvete - Zaprešić	26,9	24	10	145	8,5	9	161	9,4	8	181	10,6	7	207	12,1	189	271	460	1,00	3901
Dugo selo - S. Marof	42,7	24	20	73	7,7	18	81	8,6	16	91	9,6	14	104	11,0	189	271	460	0,88	3117

Vremenskim intervalom takta u taktom voznom redu optimizira se potreban kapacitet za određene vremenske intervale tijekom dana. U vršnim satima opterećenja se daju maksimalni kapaciteti koji ovise o stanju infrastrukture te tehničkim i tehnološkim organizacijskim normama. U svakom određenom taktu određuje potreban broj jedinica koje sudjeluju u prijevozu. Iz navedenog izraza maksimalni kapaciteti povezani su s brojem vlakova u jedinici vremena (Tablica 11).

Tablica 11: Potreban broj garnitura u taktom prometu

takt	7	8	9	10	15	20	30	60
broj trasa kroz 24 sata	207	181	161	145	96	72	48	24
broj potrebnih garnitura	12,1	10,6	9,4	8,5	5,6	4,2	2,8	1,4
satni kapacitet	5.561	4.869	4.331	3.901	2.582	1.937	1.291	646
dnevni kapacitet	95.089	83.260	74.060	66.700	44.160	33.120	22.080	11.040

<sup>8</sup> Ujedno je to granično područje gradsko-prigradskog prometa

Tablica 12: Dnevni intervali koeficijenta popunjenosti [Izvor: grafikon 1, vozni red 2018/19, HŽI]

	Koeficijent popunjenosti	Vremenski interval	Broj vlakova
$K_1$	0,05	4:30 – 6:00	7
$K_2$	0,8	6:00 – 8:30	13
$K_3$	0,1	8:30 – 13:00	12
$K_4$	0,6	13:00 – 16:30	13
$K_5$	0,1	16:30 – 21:00	13
$K_6$	0,05	21:00 – 0:05	7

Na osnovi navedenih vremenskih intervala u kojima su različiti koeficijenti popunjenosti [24] te ako je pretpostavka da se nedefinirani putnici<sup>9</sup> javljaju u znatnoj mjeri samo u vršnim satima (

Tablica 12), može se izračunati prosječna popunjenost garniture na dnevnoj razini za jedan smjer putovanja pomoću izraza (7):

$$N_p = n_{kap} \cdot [n_{v1} \cdot K_1 + n_{v2} \cdot (K_2 + K_{np2}) + n_{v3} \cdot K_3 + n_{v4} \cdot (K_4 + K_{np4}) + n_{v5} \cdot K_5 + n_{v6} \cdot K_6]$$

[putnika / dan] (7)

gdje su:

- $N_p$ - koeficijent popunjenosti
- $n_{kap}$  – kapacitet prijevoznog sredstva
- $n_{v1-6}$  – broj vlakova u određenom vremenskom intervalu
- $K_{1-6}$  – koeficijent popunjenosti kapaciteta vlaka
- $K_{np2 i 4}$  – koeficijent nedefiniranih putnika.

### 3.4 Poremećaji u prometu i akceleracijska uska grla

Poremećaji u prometu s obzirom na razloge nastanka dijele se na:

- organizacijske

<sup>9</sup> Nedefinirani putnici su putnici koji se prevoze bez prijevozne isprave ili su istu kupili u vlaku

- tehničke.

Organizacijski poremećaji nastaju:

- uvođenjem i otkazivanjem vlakova
- uvođenjem laganih vožnji
- kašnjenjem vlakova
- čekanjem na vezu s drugim vrstama prijevoza
- nepoštivanje elemenata voznog reda<sup>10</sup>
- tehničkim poremećajima.

Tehnički poremećaji nastaju zbog:

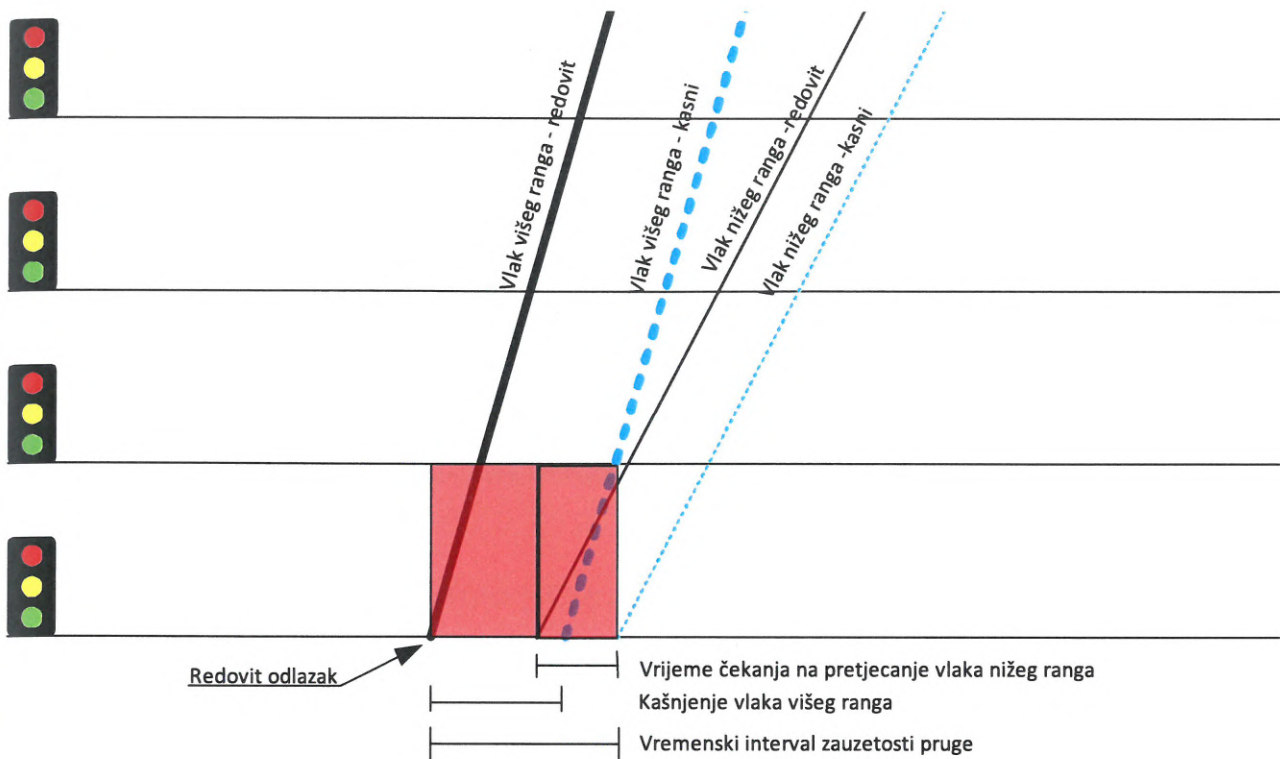
- neispravnosti vučnih ili voznih sredstava
- neispravnosti uređaja na pruzi ili kolodvoru.

Tijekom poremećaja u izvršenju voznog reda dolazi do konflikata u prometovanju vlakova. Način rješavanja konflikata ovisi o odluci eksperata prilikom organizacije prometa. Takva odluka nije uvijek optimalna i ne sagledava sve promjenjive parametre koji se mijenjaju donošenjem odluka. Optimalnost određuju kategorizacija vlakova prema važećim propisima i minimalno kašnjenje svih vlakova koji sudjeluju u vremenskom intervalu trajanja poremećaja. Temeljem znanja eksperata koji sudjeluju u regulaciji prometa, moguće je približno optimalno organizirati promet. Približno optimalno znači da takav sustav ne može predvidjeti apsolutno sve moguće situacije i konflikte koji mogu nastati (Slika 24). Crveni kvadrati označavaju vremenski interval koji zakašnjeli vlak zauzima, zbog čega vlakovi, koji bi redovito trebali otići iz kolodvora, moraju čekati. Manji broj vlaka označava njegov veći rang. Brojevi vlakova 100 – 899 označavaju vlakove najvišeg ranga, brojevi vlakova 900 – 999 označavaju ubrzane vlakove, brojevi vlakova 2000 – 5999 označavaju putničke vlakove, a brojevi vlakova 8000 – 8999 označavaju vlakove gradsko-prigradskog prometa. Istraživanje prediktivnom analizom i dobiveni rezultati petomjesečnog vremenskog razdoblja pokazuju vjerojatnost njihovog kašnjenja od 83% uz prosječno kašnjenje od 10 min/vlak.

---

<sup>10</sup> Elementi voznog reda su: tip i vrsta lokomotive, masa vlaka, maksimalne brzine na relaciji, vremena bavljenja u službenim mjestima, postotak kočenja...





Slika 24: Primjer utjecaja vlakova višeg ranga na stabilnost voznog reda prigradskih vlakova

Zbog toga sustav mora biti prilagodljiv, odnosno, osim algoritamskog pristupa mora imati mogućnost heurističkog pristupa rješavanja poremećaja u prometu. Odluke koje sustav donosi odnose se na vlakove na koje poremećaj utječe neposredno i donose se u realnom vremenu te vlakove na koje poremećaj utječe posredno i posljedica su donesenih odluka u planiranju organizacije prometa.

U iznimnim situacijama moguća je pojava potpunog zastoja sustava, međutim kvalitetnim upravljanjem i predviđanjem narednih događaja takve situacije je moguće izbjeći, što je vidljivo u istraživanjima takvih situacija u drugim modovima prijevoza [12].

Prema istraživanju [34], kod heurističkog načina zaključivanja potrebna je sposobnost sustava za donošenje zaključaka koji će u danom trenutku, kod pojave poremećaja s nepredviđenim parametrima, dopuniti bazu znanja i osigurati njeno optimalno funkcioniranje. Različitost situacija prilikom poremećaja određuje da sustav mora imati mogućnost izmjene i dopune baze znanja, ali isto tako da mora uvijek imati rješenje. Rješenje je i da svi vlakovi moraju stati ako konflikti mogu ugroziti sigurnost prometa. Kvaliteta i isplativost sustava ovise o veličini baze znanja te načinu rješavanja poremećaja u situacijama koje se pojavljuju po prvi puta.

U željezničkom prometu, gdje se promet vlakova regulira vizualnom signalizacijom uz prugu, svako zaustavljanje vlaka je potencijalno usko grlo. Takva situacija se naziva općenito usko grlo. Za vlakove koji su zaustavljeni ispred signala, po dobivenoj dozvoli za daljnju vožnju

(postavljanje signala u položaj za dozvoljenu vožnju), vrijeme potrebno za prolazak pored signala čine:

- vrijeme potrebno za pokretanje vlaka i
- vrijeme potrebno da vlak cijelom svojom dužinom prođe pored signala (ovisi o dužini i težini vlaka te o tehničkim karakteristikama vučnog vozila<sup>11</sup>).

Vrijeme koje je potrebno da prvi u nizu vlakova prođe pored signala izračunava se pomoću izraza (8):

$$t_1 = t_{pok} + t_{pv} [min] \quad (8)$$

gdje su:

- $t_1$  – vrijeme prolaska prvog vlaka pored signala
- $t_{pok}$  – vrijeme potrebno za sve radnje kako bi se vlak pokrenuo
- $t_{pv}$  – vrijeme da vlak prođe pored signala cijelom dužinom i oslobodi prostorni odsjek.

Izraz  $t_{pv}$  je promjenjiva varijabla koja ovisi o duljini vlaka i akceleracijskim sposobnostima vučnog vozila, a izračunava se pomoću izraza (9):

$$t_{pv} = \sqrt{\frac{2 \cdot l_v}{a_{vv}}} [min] \quad (9)$$

gdje su:

- $t_{pv}$  – vrijeme potrebno da vlak cijeli prođe pored signala
- $l_v$  – duljina vlaka
- $a_{vv}$  – akceleracija koju može postići vučno vozilo prema svojim karakteristikama i masi vlaka („vučni pasoš“) [35].

Vrijeme koje je potrebno narednom vlaku da se pokrene i napusti blokovni odsjek je zbroj vremena njegovog oslobađanja blokovnog odsjeka i vremena prethodnog vlaka prema izrazu (10):

$$t_2 = t_{pok2} + t_{pv} + t_1 [min] \quad (10)$$

gdje su:

---

<sup>11</sup> Vučne karakteristike svakog vučnog vozila se nazivaju „vučni pasoš“ vozila i navedene su u važećim propisima. Za svako vučno vozilo koje se kreće prugama HŽ-a, prijevoznici su dužni dati vučne karakteristike vozila.

- $t_2$  – vrijeme koje je potrebno narednom vlaku da napusti blokovni odsjek
- $t_{pok2}$  – vrijeme pokretanja narednog vlaka
- $t_{pv2}$  – vrijeme prolaska narednog vlaka pored signala.

Vrijeme potrebno sljedećem vlaku u nizu da oslobodi blokovni odsjek računa se pomoću izraza (11):

$$t_3 = t_{pok3} + t_{pv3} + t_2 [min] \quad (11)$$

gdje su:

- $t_3$  – vrijeme trećeg vlaka u nizu da napusti blokovni odsjek
- $t_{pok3}$  – vrijeme pokretanja trećeg vlaka
- $t_{pv3}$  – vrijeme prolaska trećeg vlaka u nizu pored signala.

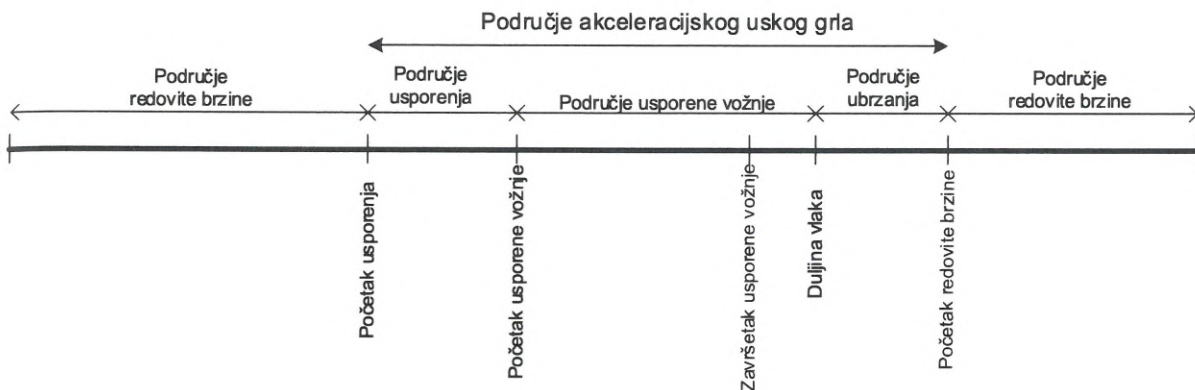
Iz prethodnih izraza može se zaključiti da se za izračunavanje vremena potrebnog za oslobađanje prostornog odsjeka bilo kojeg vlaka u nizu može koristiti izraz (12):

$$t_n = t_{pokn} + t_{pvn} + t_{n-1} [min] \quad (12)$$

gdje su:

- $t_n$  – vrijeme potrebno da vlak napusti blokovni odsjek
- $t_{pokn}$  – vrijeme pokretanja vlaka
- $t_{pvn}$  – vrijeme prolaska vlaka pored signala
- $t_{n-1}$  – ukupno vrijeme prethodnog vlaka potrebno za oslobađanje blokovnog odsjeka.

Locirane i utvrđene slabosti u željezničkom prometnom sustavu prepoznaju se kao moguća unapređenja potrebna da bi željeznički prijevoz bio konkurentan ostalim modovima prijevoza u skladu sa smjernicama EU. Lociranjem slabosti i rješavanjem istih utječe se na stabilnost i kvalitetu voznog reda [36]. Slabosti i nedostaci utvrđeni na željezničkoj mreži RH odnose se na stanje infrastrukture kao uzrok nestabilnosti voznog reda, naročito u područjima akceleracijskih uskih grla (Slika 25).



Slika 25: Prikaz akceleracijskog uskog grla [Izvor: autor]

Pojam akceleracijskog uskog grla opisan je u cestovnom prometu [37] kao akceleracijsko usko grlo dva toka prometa. Međutim, zbog razlike između cestovnog i željezničkog prometa, u željezničkom prometu predstavlja dionicu pruge gdje dolazi do usporenja prometa zbog tehničkih ili organizacijskih razloga te se promet odvija pod određenim uvjetima, ali nije zaustavljen.

U slučajevima kada vlakovi čekaju zbog pretjecanja u bilo kojoj točki gdje je to moguće izvesti, takvi slučajevi se mogu usporediti s modelom dva toka. S obzirom na specifičnosti svakog od navedenih modova prijevoza, postoje razlike između navedenih modela dva toka u cestovnom prometu u odnosu na željeznički promet prema tri uspoređujuća parametra: mjesto pretjecanja, utjecaj na kretanje vozila koja se pretječu i utjecaj na vrijeme pretjecanog vozila (Tablica 13):

Tablica 13: Razlike tumačenja dva toka prometa prilikom nastajanja akceleracijskog uskog grla

CESTOVNI PROMET	ŽELJEZNIČKI PROMET
Pretjecanje je moguće na svakom dijelu prometnice	Pretjecanje je moguće samo u točkama gdje su ugrađene skretnice
Vozila su u kretanju	Vlak koji čeka pretjecanje mora stajati u kolodvoru
Ne utječe na vrijeme putovanja sporijeg vozila	Vlak koji čeka akumulira zakašnjenje

Akceleracijsko usko grlo može nastati kao uzrok stanja infrastrukture i tada se odnosi na sve vlakove koji prolaze preko određenog područja. Također, nastaje kao posljedica hijerarhije kada vlak višeg ranga s obzirom na vremensku komponentu kašnjenja ulazi u vremenske intervale voznog reda drugih vlakova.

U slučaju akceleracijskog uskog grla, odnosno nestabilnosti u izvršenju voznog reda uzrokovane smanjenjem redovite brzine na određenom dijelu pruge, nastaju tri moguća stanja vlakova u kretanju i to:

- Kada nema narednog vlaka, usporenje se odražava na vlak koji se nalazi na tom dijelu pruge.
- Kada se između vlaka koji se nalazi na dijelu pruge gdje je uvedena lagana vožnja i narednog vlaka nalazi jedan slobodan prostorni odsjek, usporenje se događa kod oba vlaka.
- Kada se između vlaka koji se nalazi na dijelu pruge gdje je uvedena lagana vožnja i narednog vlaka ne nalazi ni jedan slobodan prostorni odsjek, kod prethodnog vlaka dolazi do usporenja, a naredni vlak mora stati kod prostornog signala dok se prostorni odsjek ne oslobodi.

Produženje voznog vremena vlaka zbog uvedene lagane vožnje ovisi o vrsti vlaka, maksimalnoj dopuštenoj brzini, ograničenju brzine i zaustavnom putu na određenoj dionici pruge.

Za izračunavanje dodatnog vremena vožnje zbog uvedene usporene vožnje za putničke vlakove se koristi izraz (13):

$$t_p = \frac{l_z}{\frac{1}{2}(v_{max}+v_{min})} + \frac{l+l_{pkp}}{v_{min}} + \frac{l_{ubp}}{\frac{1}{2}(v_{max}+v_{min})} - \frac{l+l_{pkp}+l_z+l_{ubp}}{v_{max}} [min] \quad (13)$$

Za izračunavanje dodatnog vremena vožnje zbog uvedene lagane vožnje za teretne vlakove se koristi izraz (14):

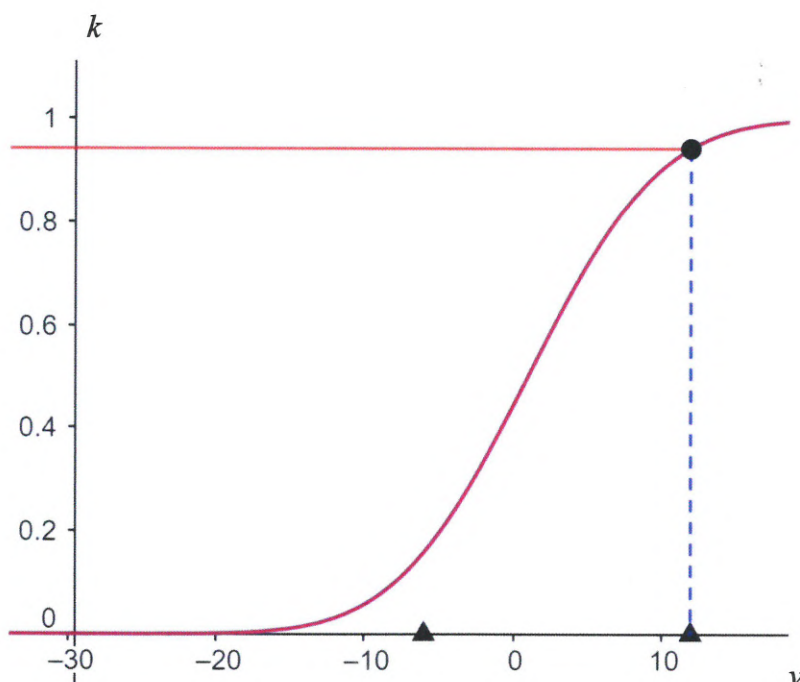
$$t_t = \frac{l_z}{\frac{1}{2}(v_{max}+v_{min})} + \frac{l+l_{pkt}}{v_{min}} + \frac{l_{ubt}}{\frac{1}{2}(v_{max}+v_{min})} - \frac{l+l_{pkt}+l_z+l_{ubt}}{v_{max}} [min] \quad (14)$$

gdje su:

- $t_p, t_t$  – dodatna vremena vožnje za putničke/teretne vlakove
- $v_{max}$  – redovita maksimalna brzina vlaka na dionici pruge (m/min)
- $v_{min}$  – uvedena ograničena brzina vlaka na dijelu dionice pruge (m/min)
- $l$  – dužina uvedene ograničene brzine (m)
- $l_z$  – duljina propisanog zaustavnog puta na dionici (m)
- $l_{pkp}$  – udaljenost za usporenje prije početka lagane vožnje putničkih vlakova (prosječno 200m)

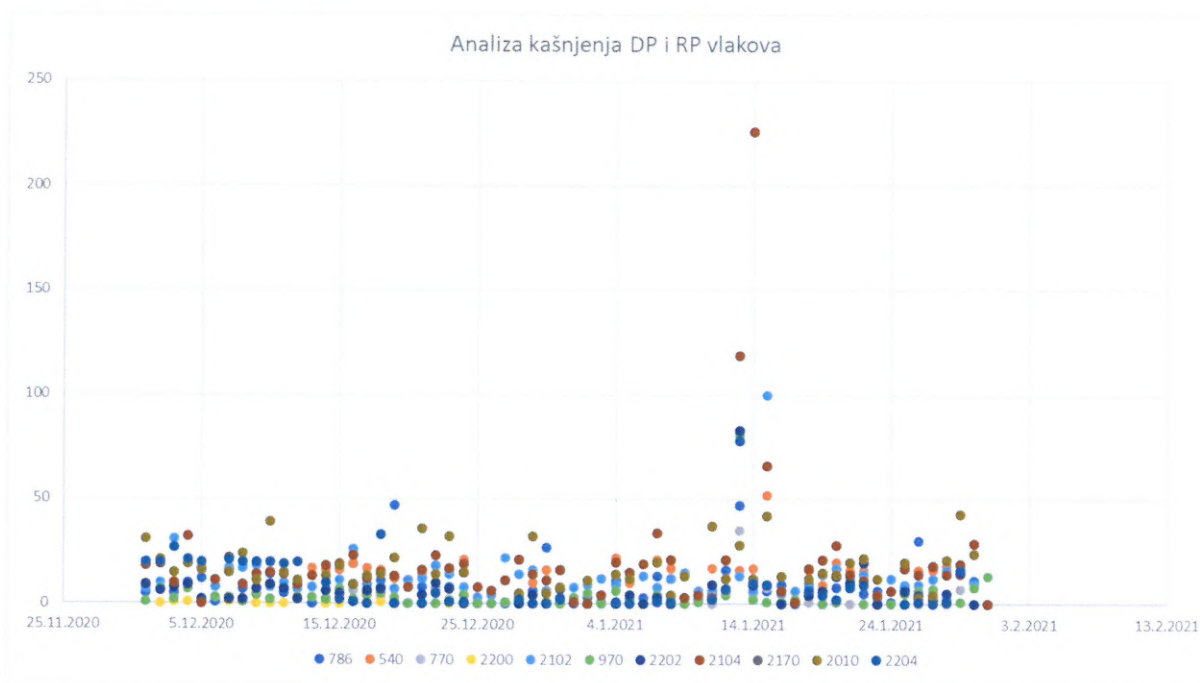
- $l_{pkt}$  – udaljenost za usporenje prije početka lagane vožnje teretnih vlakova (prosječno 600 m)
- $l_{ubp}$  – udaljenost od početka ubrzanja do postizanja redovite brzine putničkih vlakova – prosječno 400 m)
- $l_{ubt}$  – udaljenost od početka ubrzanja do postizanja redovite brzine teretnih vlakova – prosječno 800 m).

Postotak prohodnosti pruge određuje kojom brzinom vlak može prometovati na dijelu pruge gdje je smanjena projektirana brzina. Grafičkim prikazom (Slika 26) je prikazan odnos brzine ( $v$ ) po osi  $x$  i koeficijent prohodnosti ( $k$ ) pruge po osi  $y$ . S obzirom na definirane kritične brzine vučnih vozila, oznakom trokuta je pozicionirana prosječna kritična brzina te ukoliko je koeficijent prohodnosti manji, pruga se smatra neprohodnom. Oznaka točke je područje od kojeg vlakovi prometuju maksimalno projektiranom brzinom.



Slika 26: Postotak prohodnosti pruge u odnosu na iskorištenost projektirane brzine

### 3.5 Prediktivna analiza kašnjenja vlakova na području gradsko-prigradskog prometa



Slika 27: Analiza kašnjenja vlakova u području GPP-a u vrijeme jutarnjeg vršnog opterećenja (Izvor: HŽ Infrastruktura)

Tijekom analize međusobnog utjecaja vlakova u putničkom prometu rezultati su pokazali da svako odstupanje u voznom redu vlakova višeg ranga ima veliki utjecaj na niže rangirane vlakove. Na grafikonu analiziranog kašnjenja (Slika 27) prikazan je vremenski interval jutarnjeg vršnog opterećenja na relaciji Dugo Selo – Zagreb GK. U navedenom razdoblju prometuju: tri brza vlaka, jedan ubrzani vlak, šest putničkih vlakova iz regionalnog prijevoza i 11 vlakova GPP-a. Putnički vlakovi iz regionalnog prijevoza su uključeni u gradsko-prigradski promet. Vjerojatnost kašnjenja vlakova koji ulaze u područje gradsko-prigradskog područja iznosi 86%, uz prosječno kašnjenje od 10 minuta (Tablica 14).

Tablica 14: Analiza kašnjenja vlakova koji ulaze u područje gradsko-prigradskog prometa

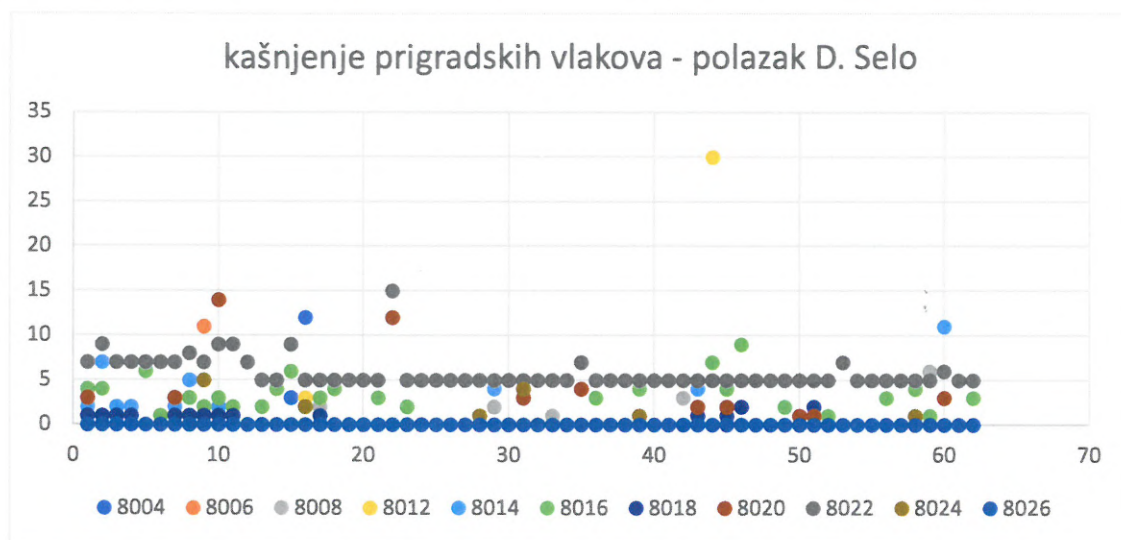
broj vlaka	786	540	770	2200	2102	970	2202	2104	2170	2010	2204	PROSJEK
prosječno kašnjenje	0:09	0:17	0:04	0:01	0:12	0:03	0:06	0:15	0:12	0:17	0:10	0:10
R vlakova	16	0	13	10	1	16	11	3	1	0	8	14%
ukupno vlakova	92	35	32	21	62	62	49	62	41	49	44	549
vjerojatnost kašnjenja	83%	100%	59%	52%	98%	74%	78%	95%	100%	100%	82%	100%

Vjerojatnost kašnjenja prigradskih vlakova iznosi 52%, uz prosječno kašnjenje od 2 minute (Tablica 15).

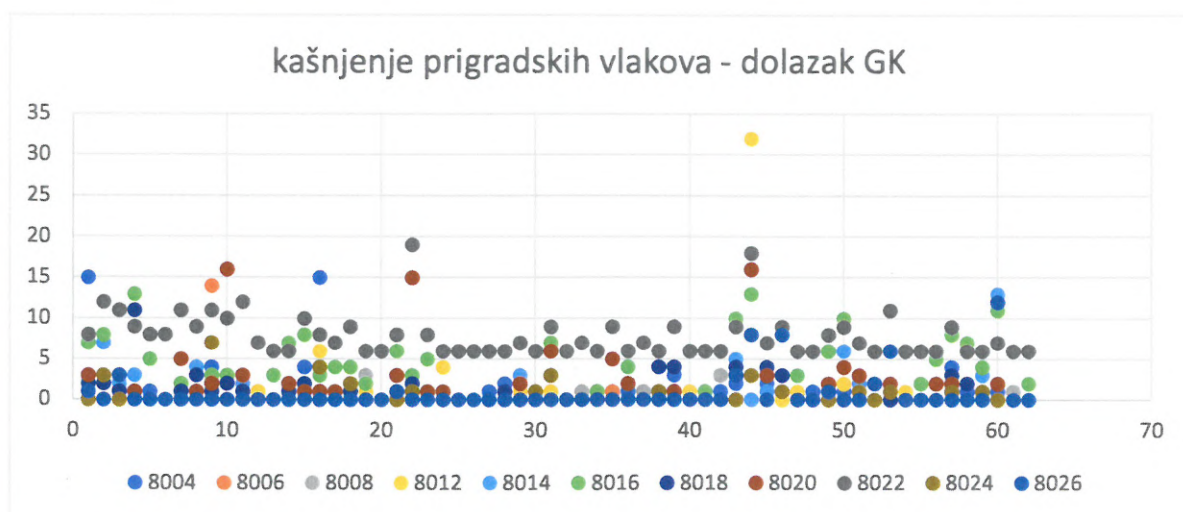
Tablica 15: Analiza kašnjenja prigradskih vlakova

broj vlaka	8004	8006	8008	8012	8014	8016	8018	8020	8022	8024	8026	PROSJEK
prosječno kašnjenje	0:01	0:00	0:02	0:01	0:01	0:03	0:02	0:02	0:07	0:00	0:00	0:02
R vlakova	26	31	47	29	17	20	13	8	0	27	52	44%
ukupno vlakova	62	41	62	46	41	62	41	40	62	41	62	560
vjerojatnost kašnjenja	58%	24%	24%	37%	59%	68%	68%	80%	100%	34%	16%	52%

Kako je analizom dokazano da u klasifikaciji kašnjenja prigradskih vlakova veliki udio (68%) čine kašnjenja zbog čekanja na pretjecanje i čekanja na garnituru iz obrta (Slika 28, Slika 29), tako se takva kašnjenja mogu anulirati djelomičnom organizacijskom izmjenom.



Slika 28: Analiza kašnjenja prigradskih vlakova prilikom odlaska iz obrtnog kolodvora



Slika 29: Analiza kašnjenja vlakova prilikom dolaska u Zagreb GK



Da bi se osigurala kvaliteta planiranog voznog reda, u proračune je potrebno uvrstiti predvidljiva zakašnjenja. Pri tome se u obzir uzimaju stanje infrastrukture i planirano održavanje, a kvaliteta usluge u postotcima može biti odnos između projektirane i stvarne komercijalne brzine na pruži.

Za izračunavanje predvidljivih zakašnjenja prema programu „STRELE“ [16], koji se koristi na željeznicama DB, u niže navedeni izraz (15) uvršteni su parametri dobiveni analizom prometa vlakova iz studije slučaja:

$$t = \left( p_{del} - \frac{p_{del}^2}{2} \right) \cdot \frac{\bar{t}_{del}^2}{\bar{t}_b + \bar{t}_{del} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\bar{h}}{\bar{t}_{del}}} \right)} \cdot \left[ p_{eq} \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{\bar{h}_{eq}}{\bar{t}_{del}} \right)} \right)^2 + (1 - p_{eq}) \cdot \frac{\bar{h}_{diff}}{\bar{t}_{del}} \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{2\bar{h}_{diff}}{\bar{t}_{del}} \right)} \right) + \frac{\bar{h}}{\bar{t}_b} \cdot \left( 1 - e^{-\left( \frac{\bar{h}}{\bar{t}_{del}} \right)} \right) \right] \quad (15)$$

gdje su:

- $t$  – predvidljivo zakašnjenje
- $p_{del}$  - vjerojatnost primarnog kašnjenja
- $\bar{t}_{del}$  – prosječno kašnjenje vlakova u zakašnjenju
- $\bar{t}_b$  – prosječno rezervno vrijeme
- $p_{eq}$  – vjerojatnost vlakova istog ranga
- $\bar{h}$  – prosječno minimalno vrijeme slijeđenja
- $\bar{h}_{eq}$  – prosječno minimalno vrijeme slijeđenja vlakova istog ranga
- $\bar{h}_{diff}$  – prosječno minimalno vrijeme slijeđenja vlakova različitog ranga.

### 3.6 Prediktivna analiza u funkciji predviđanja potrebnih kapaciteta

Kvaliteta usluge prijevoza putnika se odražava na vozni red, a definirana je sljedećim obilježjima [38]:

- ukupno vrijeme putovanja i brzina prijevoza,
- pouzdanost voznog reda (redovitost i točnost),
- frekvencija polazaka,
- sigurnost prijevoza,

- udobnost u kolodvorima i vlakovima,
- pristupačnost kolodvorima i stajalištima,
- usklađenost s ostalim modovima prometa,
- odnos osoblja prema putnicima,
- dodatne usluge u vlakovima i kolodvorima,
- informiranost putnika.

Upotrebom matematičkih modela za izračunavanje parametara neophodnih za organizaciju prigradskog prijevoza putnika osigurava se stabilnost voznog reda. Prediktivna analiza služi da se pomoću metode analize previđa planiranje i budući razvoj. Ukoliko se analizira duže povijesno razdoblje, rezultati predikcije će biti precizniji. Prema navedenom, obilježja kvalitete usluge mogu biti podijeljena u dvije grupe ovisne o:

- vremenskoj komponenti u koju spadaju:
  - o ukupno vrijeme putovanja i brzina prijevoza
  - o pouzdanost voznog reda (redovitost i točnost)
  - o frekvencija polazaka
  - o usklađenost s ostalim modovima prijevoza
- uslužnoj komponenti u koju spadaju:
  - o udobnost u kolodvorima i vlakovima
  - o dodatne usluge u vlakovima i kolodvorima
  - o informiranost putnika
  - o pristupačnost kolodvorima i stajalištima
  - o odnos osoblja prema putnicima.

Liberalizacijom željezničkog tržišta, osim nacionalnih prijevoznika, javljaju se i privatni prijevoznici koji moraju udovoljavati kriterijima u zakonskim i podzakonskim aktima. Zakonski i podzakonski akti moraju biti u skladu sa smjernicama EU u vezi stabilnosti i održivosti voznog reda. Prilikom istraživanja zakonskih i podzakonskih akata dolazi se do zaključka da su isti još uvijek u „prijelaznom“ razdoblju između monopolskog i liberizacijskog tržišta. U pokušaju da se zakonski akti RH prilagode smjernicama EU, nastali su propusti i

nedorečenosti u pojedinim dijelovima organizacije i tehnologije prometa. Sigurnosni parametri nisu ugroženi, ali se neki podzakonski organizacijski akti nisu uskladili u potpunosti kako bi nacionalni prijevoznici (putnički i teretni) ostali konkurentni na prijevoznom tržištu. Primjerice, putnički prijevoz ne prati tokove putnika te u suradnji s upraviteljem infrastrukture ne vrši korekciju mjesta na kojima bi trebala biti dislocirana stajališta ili izgrađeni intermodalni terminali. Optimalnim pozicioniranjem intermodalnih terminala u GPP-u, s obzirom na gustoću i sastav stanovništva u područjima koja su na određenoj udaljenosti od glavnog željezničkog pravca, osigurava se kvaliteta plana prijevoza putnika [20, 39]. Analizom i komparacijom tokova putnika na određenom urbanom području, prema kriterijima upravitelja infrastrukture i prijevoznika, moguće je predviđati optimalni smještaj intermodalnih terminala u prostoru.

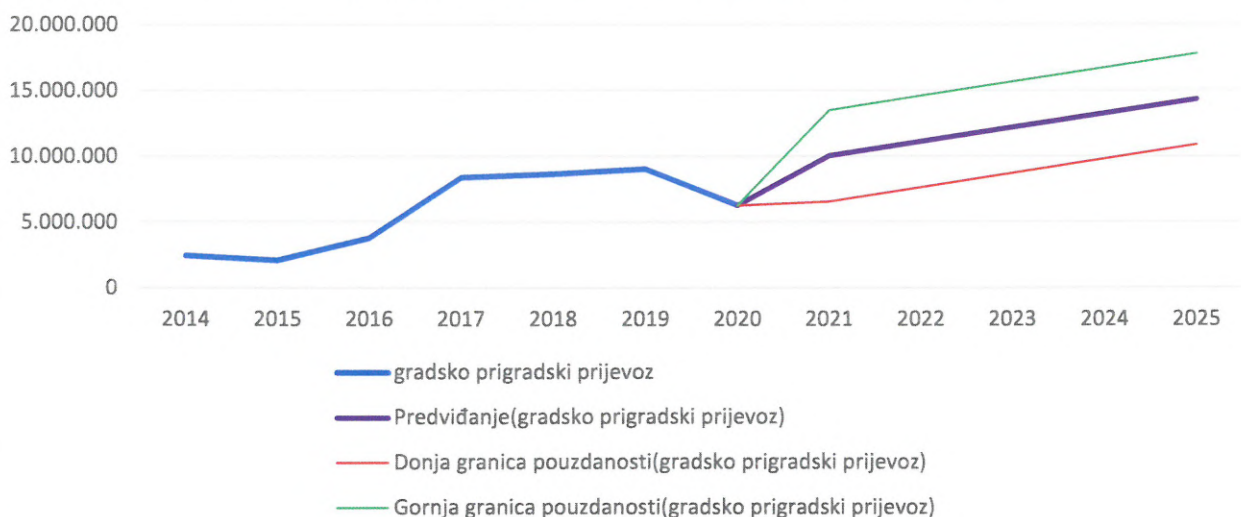
Prediktivna analiza se oslanja na analizu prethodnog stanja koje se promatra. Što je analizirano razdoblje duže, to je predikcija pouzdanija. Postoje tri scenarija predikcije: pesimistički, realni i optimistički. Pesimistički scenarij predviđa smanjenje u budućem razdoblju zbog negativnog trenda, u ovom slučaju, pada broja prevezenih putnika. Realni scenarij predviđa nastavak trenda rasta ili pada s obzirom na prirodnu inerciju i nepromijenjeno stanje sustava, dok optimistički scenarij predviđa veći rast s obzirom na namjeravano povećanje kvalitete prijevoza ili uvođenje mjera za poticanje korištenja vrste analiziranog prijevoza. Kao primjer u Tablica 16 prikazani su prevezeni putnici prema podacima HŽ PP-a u razdoblju 2014. – 2020. godine i podijeljeni su prema vrsti prijevoza.

Tablica 16: tablica prevezenih putnika (Izvor: HŽ PP)

Godina	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.
<b>Unutarnji prijevoz</b>	21.527.614	21.331.180	20.411.732	19.512.781	19.942.418	19.524.852	12.962.876
<b>lokalni i daljinski prijevoz</b>	19.068.000	19.215.000	18.281.000	11.138.166	11.282.656	10.466.029	6.661.239
<b>gradsko prigradski prijevoz</b>	2.460.000	2.115.000	3.779.000	8.374.615	8.659.762	9.058.823	6.301.637
<b>Međunarodni prijevoz</b>	398.041	351.868	330.217	319.701	328.261	329.346	140.564

Predikcija potrebnih prijevoznih kapaciteta je rezultat kvalitetne analize dosadašnje iskorištenosti kapaciteta. Za dnevne vršne sate opterećenja potrebno je osigurati maksimalne kapacitete. Prema analizi prevezenih putnika u razdoblju 2014. – 2020. godine predikcija kretanja tokova putnika za razdoblje 2020. – 2025. godine pokazuje porast broja putnika u gradsko-prigradskom prometu (Slika 30).

## Predikcija prijevoza putnika u razdoblju 2020. - 2025.



Slika 30: Predikcija prijevoza putnika gradsko-prigradskog prometa u razdoblju 2020. – 2025. godine (Izvor: HŽ PP)

Maksimalni kapaciteti mogu biti osigurani tehničkim i tehnološkim metodama. Tehničko povećanje kapaciteta je moguće:

- povećanjem kapaciteta garnitura i
- povećanjem broja garnitura što je ograničeno maksimalnom propusnošću pruge.

Tehnološko povećanje kapaciteta sadrži:

- novim metodama organizacije prijevoza,
- optimizacijom upotrebe infrastrukturnih kapaciteta
- optimizacijom upotrebe voznih sredstava
- optimizacijom vremenskih parametara slijeđenja vlakova
- klasifikacijom vlakova koja osigurava stabilnost voznog reda.

## 4 Upotreba vremenskih parametara u definiranju prometa

### 4.1 Izračun intervala slijeđenja

Prema UIC 405 preporuci, interval uzastopnog minimalnog vremena slijeđenja se izračunava izrazom (16):

$$T_{sm} = \frac{\sum t_{sm}}{n_v} \quad (16)$$

Prilikom izrade voznog reda, minimalnom uzastopnom vremenu slijeđenja se pribrajaju dodatno i rezervno vrijeme. Time se uz kvalitetu postiže i stabilnost voznog reda.

Na kritičnoj dionici s četiri blokovna odsjeka, minimalnom uzastopnom vremenu slijeđenja dodaje se dodatno vrijeme koje je rezultat množenja broja blokovnih odsjeka s 0,25 minuta i rezervno vrijeme dobiveno množenjem minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova s 0,33 za izračunavanje satne propusnosti, odnosno s 0,67 za izračunavanje dnevne propusnosti pruge.

Pretpostavka je da se svi vlakovi zaustavljaju u prethodnom i narednom kolodvoru. U tom slučaju se uspoređuju intervali minimalnog slijeđenja vlakova za nailazak vlaka na mjerodavni međukolodvorski razmak nakon zaustavljanja u prethodnom kolodvoru i prolaska prethodnog vlaka kroz dva najduža blokovna odsjeka. Prilikom izračuna, kao mjerodavan se uzima blokovni odsjek s najvećim vremenskim intervalom prolaska. Izračun intervala minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova prema objavi UIC 405-1 [40] sastoji se od segmenata izračuna vremena prolazaka ovisnih o odnosu duljine i vremena vožnje različitih vrsta vlakova:

- prosječni interval minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova,  $t_{sm}$
- vozna vremena u blokovnim razmacima,  $t_{l_{A-B}}$ ,  $t_{l_{A-C}}$ ,  $t_{l_{A-D}}$
- vožno vrijeme od točke vidljivosti ulaznog signala do sredine kolodvora A  $t_{l_{s'A}}$
- izračunavanje vremena vožnje od točke vidljivosti do signala kojim započinju dva najdulja susjedna blokovna odsjeka  $t_{l_{s'C}}$
- vožno vrijeme na slobodnom blokovnom odsjeku  $t_{lR}$
- interval slijeđenja vlakova  $t_s$ .

Prosječni interval minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova ( $t_{sm}$ ) je srednja vrijednost svih intervala minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova koji se računaju za sve slučajeve slijeđenja

vlakova na promatranom ograničavajućem međukolodvorskom razmaku<sup>12</sup> i izračunava se prema izrazu (17):

$$t_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} n_i \cdot t_{si} + \sum_{j=1}^{n_u} n_j \cdot t_{sj}}{\sum n_{ij}} [\text{min/vlak}] \quad (17)$$

gdje su:

- $t_{sm}$  – prosječni interval minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova
- $n_i$  – broj slučajeva uzastopno slijeđenih vlakova prema kategoriji  $i$
- $n_j$  – broj slučajeva uzastopno slijeđenih vlakova prema kategoriji  $j$
- $t_{si}$  – intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova između dviju kategorija voznih vremena
- $t_{sj}$  – intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova između dviju kategorija voznih vremena
- $n_p$  – broj prethodnih vlakova
- $n_u$  – broj uzastopnih vlakova.

Vrijednosti  $n_i$  i  $n_j$  ovise o određenim kategorijama u koje su svrstani vlakovi te se vremena unose u kosu tablicu.

Određivanje kategorije vlakova ograničeno je na dvije do četiri kategorije kako bi se pojednostavnio izračun. Ako su vlakovi dobro kategorizirani, razlika između zbroja voznih vremena svih vlakova i zbroja voznih vremena svih kategoriziranih vlakova ne smije biti veća od 2%.

$$\sum t_{vs} - \sum t_{vk} = |T| \rightarrow \left| \frac{T}{\sum t_{vs}} \cdot 100 \right| < 2\%$$

gdje su:

- $T$  – apsolutna razlika zbrojeva vremena vožnji
- $t_{vs}$  – stvarno vozno vrijeme vlakova
- $t_{vk}$  – vrijeme vožnje vlakova prema kategorijama.

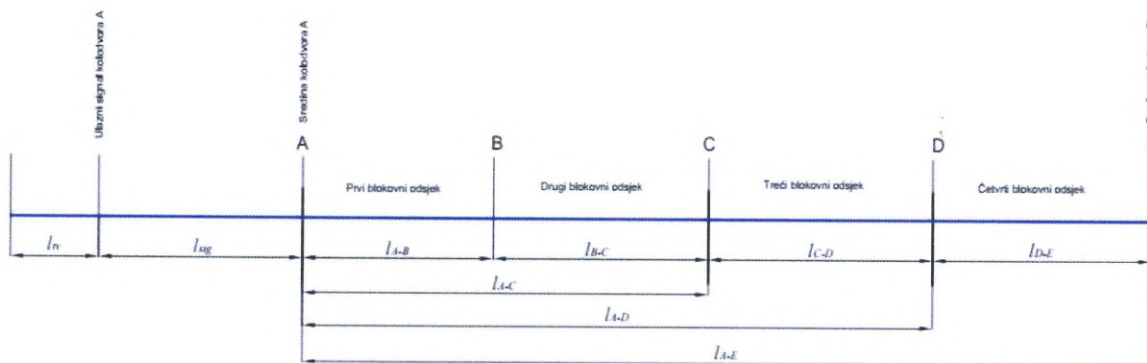
<sup>12</sup> Ograničavajući kolodvorski razmak je onaj koji ima najdulji vremenski interval prometovanja između dva kolodvora na promatranom pravcu.

Matrica slijeđenja vlakova (Tablica 17) služi kako bi se odredila dodatna vremena koja su potrebna za izradu kvalitetnog intervala slijeđenja kako ne bi došlo do efekta akceleracijskog uskog grla [37].

Tablica 17: Matrica slučajeva slijeđenja vlakova

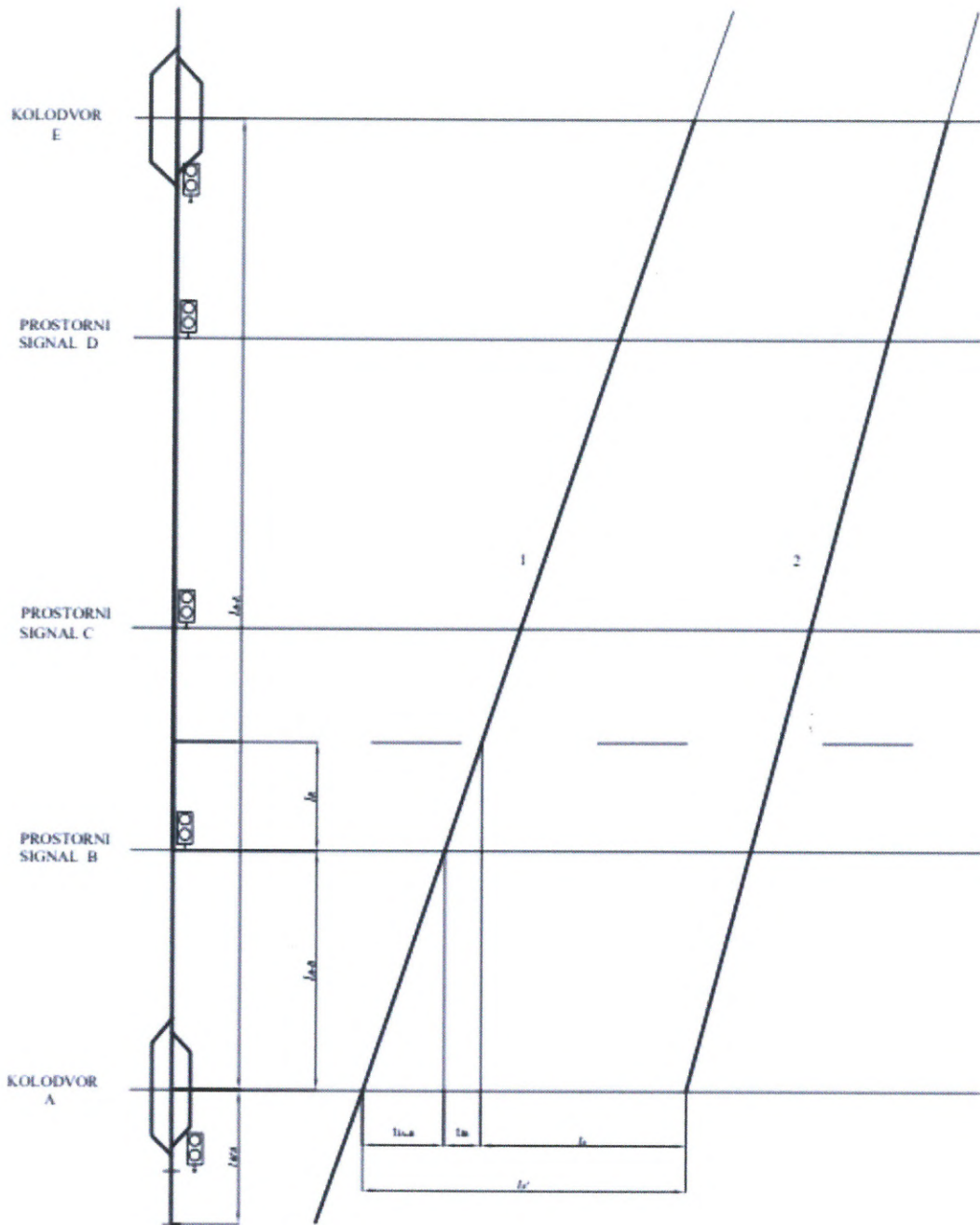
i		UZASTOPNI VLAK					
		t <sub>1</sub>		t <sub>2</sub>		t <sub>3</sub>	
		ZAUST. U „A“	PROLAZ „A“	ZAUST. U „A“	PROLAZ „A“	ZAUST. U „A“	PROLAZ „A“
PRETHODNI VLAK	t <sub>1</sub>	1	1		2		
	t <sub>2</sub>	2		3			1
	t <sub>3</sub>			1			

Nakon izrade matrice slijeđenja potrebno je za svaku kategoriju vlaka izračunati vozna vremena u blokovnim razmacima (Slika 31).



Slika 31: Prikaz udaljenosti blokovnih odsjeka

Kako bi se izračunala sva potrebna vremena koja svaka kategorija vlaka ima na cijeloj dionici kretanja od A – E, početak izračuna je izračunavanje voznog vremena od točke vidljivosti ulaznog signala kolodvora A do njegove sredine ( $t_{1s'A}$ ). Rezultat je količnik dobiven u odnosu umnoška kategorije vremena putovanja i udaljenosti od točke vidljivosti ulaznog signala do sredine kolodvora i ukupne udaljenosti A -E (Slika 32).



Slika 32: Prikaz intervala minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova u blokovnom razmaku

Ako su brzine vlakova manje od 80 km/h, računaska udaljenost vidljivosti signala<sup>13</sup> je 200 m dok je za brzine iznad 80 km/h udaljenost 500 m.

Prosječna udaljenost od točke vidljivosti ulaznog signala do sredine kolodvora je zbroj prethodne udaljenosti i udaljenosti ulaznog signala od sredine kolodvora. Vremena vožnje od

<sup>13</sup> Računska vidljivost signala je minimalna udaljenost s koje se može vidjeti signalni znak koji pokazuje signal kako bi vozno osoblje moglo postupati u skladu s tim.



točke vidljivosti do signala kojim započinju dva najdulja susjedna prostorna odsjeka  $t_{ls'C}$  računa se prema izrazu (18):

$$t_{ls'C} = \frac{t_l \cdot l_v}{l_{A-E}} \quad [min] \quad (18)$$

Izračunavanje voznog vremena na slobodnom prostornom odsjeku  $t_{lR}$  prema izrazu (19)

$$t_{lR} = \frac{t_l \cdot (l_R + l_v)}{l_{A-E}} \quad [min] \quad (19)$$

gdje su:

- $l_R$  – put pretrčavanja
- $l_v$  – duljina vlaka koja je određena ovisno o maksimalnoj brzini vlaka i iznosi:
  - o  $v < 80$  km/h za duljinu vlaka  $l_v = 700$  m,
  - o  $v > 80$  km/h za duljinu vlaka  $l_v = 500$  m.

Postoje tri slučaja intervala slijeđenja vlakova ( $t_s$ ) te se za svaki izračunava vremenski interval:

a) Slučaj – uzastopni vlak se zaustavlja u kolodvoru A izraz (20):

$$t_s = t_{l_{AE}} + t_{lR} + t_A [min] \quad (20)$$

gdje je:

- $t_A$  – vrijeme potrebno za davanje i primanje signala za polazak, dobiva se snimanjem na terenu i iznosi 0,4 s.

b) Slučaj – uzastopni vlak prolazi kroz kolodvor A izraz (21):

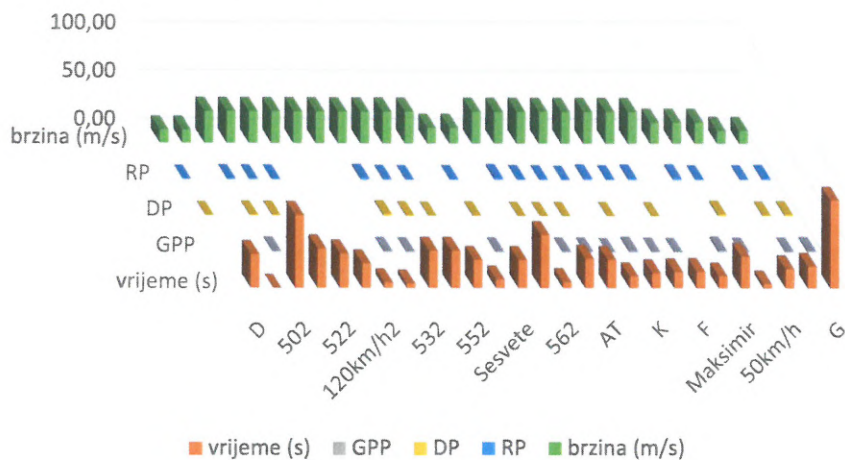
$$t_s = t_{l_{AE}} + t_{lR} + t_{ls'A} \quad (21)$$

c) Slučaj – interval minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova za kolodvor A u odnosu na vožnju vlaka kroz dva najdulja susjedna blokovna odsjeka izraz (22):

$$t_s = t_{l_{AE}} + t_{lR} - (t_{l_{AD}} - t_{ls'D}) [min] \quad (22)$$

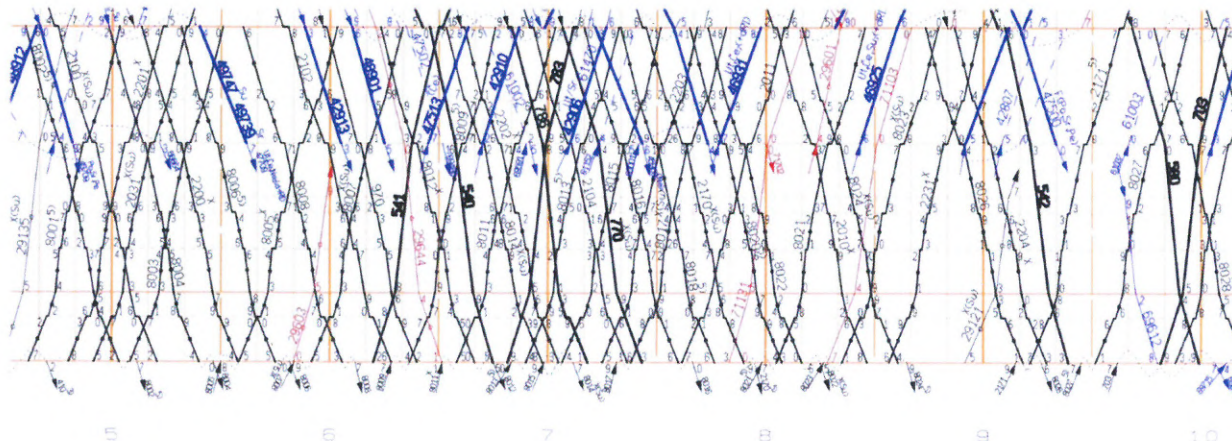
Na promatranj dionici razlika u komercijalnoj brzini ovisi o predviđenim stajanjima, odnosno o broju stajališta između dva kolodvora (Slika 33).

## pregled brzina vlakova



Slika 33: Grafički prikaz odnosa vremena putovanja i brzine

Na temelju navedenih izračuna izrađen je vozni red 2020/21., a vremenski interval jutarnjeg vršnog opterećenja je u vremenskom intervalu 06:00 – 10:00 sati (Slika 34).



Slika 34: Grafički prikaz voznog reda 2020/21. [Izvor: HŽ Infrastruktura]

### 4.1.1 Dodatno vrijeme

Dodatno vrijeme je moguće odrediti na dva načina:

- izračunavanjem prema odredbama UIC 405
- aplikacijskim postavkama.

Prema izračunu iz UIC 405 preporuka, dodatno vrijeme ( $t_d$ ) se računa na način da se broj prostornih odsjeka između dva kolodvora ( $n_{bo}$ ) pomnoži s 0,25 i dobiveni rezultat se pribroji minimalnom intervalu slijeđenja vlakova izraz (23).

$$t_d = 0,25 \cdot n_{bo} \quad (23)$$

HŽ Infrastruktura koristi aplikacijski sustav „Roman Planning“ prilikom izrade voznog reda. U programu su postavke određene na način da se izračunato vrijeme vožnje između dvije točke mjerenja zaokružuje na viši cijeli broj te je zbroj svih zaokruživanja između dva kolodvora rezervno vrijeme koje se pribraja minimalnom intervalu slijeđenja.<sup>14</sup>

#### 4.1.2 Minimalni interval slijeđenja vlakova

Uspoređujući izračunavanje intervala slijeđenja s prosječnom vrijednošću rezervnog vremena i dinamičkog određivanja rezervnog vremena, koje ovisi o kategoriji prethodnih i uzastopnih vlakova, na primjeru jutarnjih vršnih sati opterećenja na dionici Dugo Selo – Sesvete, dinamički izračun optimizira iskorištenje infrastrukture povećavajući broj vlakova koji mogu prometovati u navedenom vremenskom intervalu, a time i propusnost pruge za 8%, s postojećim vrijednostima komercijalnih brzina vlakova. Prosječno vrijeme slijeđenja iznosi 6,4 minuta, a prikaz vremena slijeđenja predloženom metodom prikazuje Tablica 18.

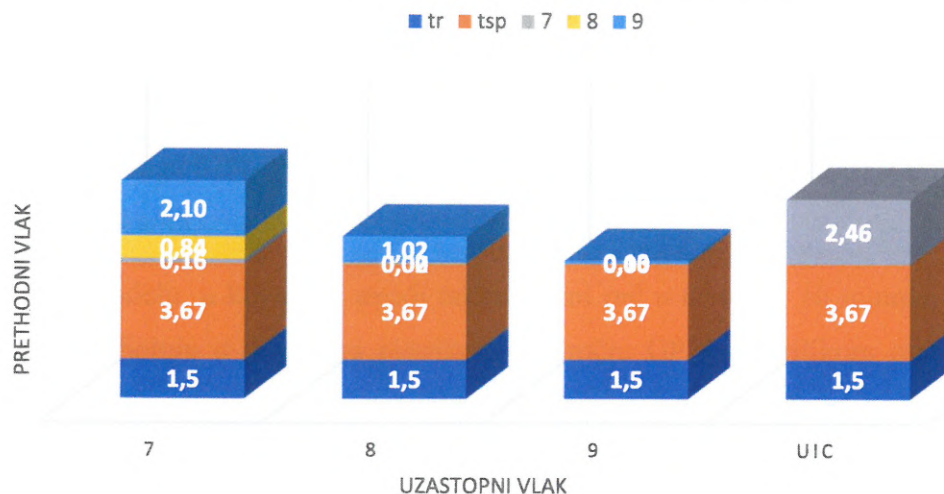
Tablica 18: Minimalni interval uzastopnog slijeđenja prema kategorijama vlakova

		PRETHODNI ( $t_{pi}$ )				
		$t_r$	$t_{sp}$	7	8	9
UZASTOPNI ( $t_{pi}$ )	7	1,5	3,67	0,16	0,84	2,10
	8	1,5	3,67	0,00	0,02	1,02
	9	1,5	3,67	0,00	0,00	0,13
	UIC	1,5	3,67	2,46		

Usporedba prikazuje na koji način se optimizira vrijeme slijeđenja upotrebom dinamičkog izračuna rezervnog vremena (Slika 35).

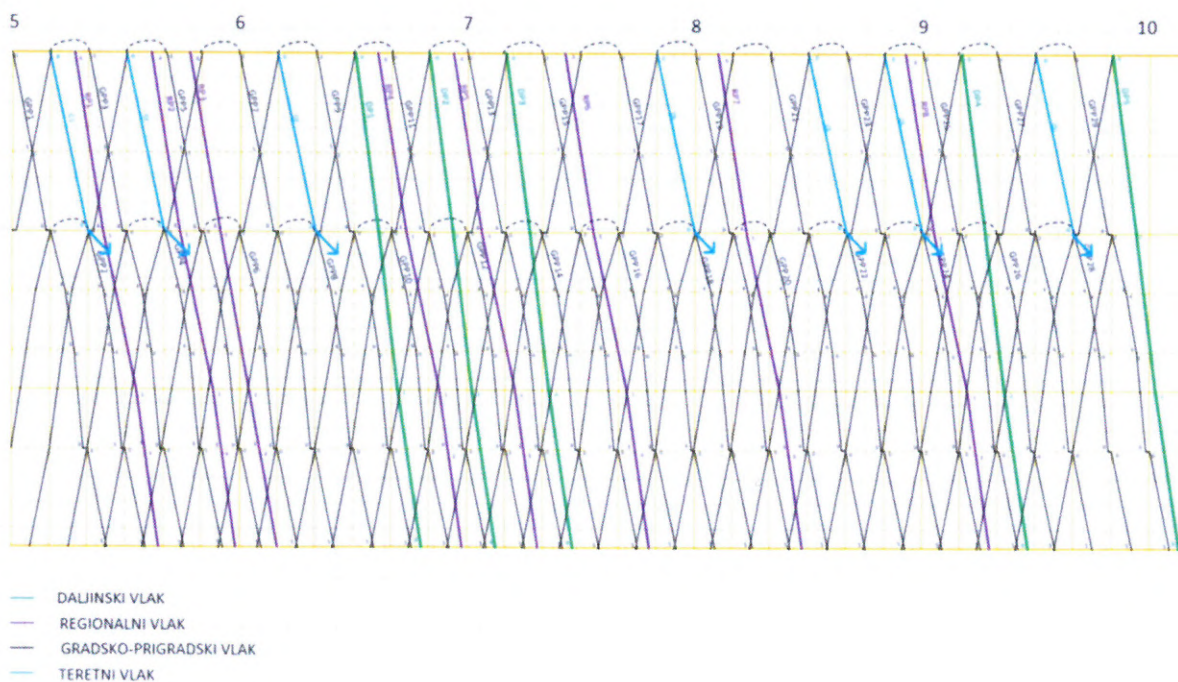
<sup>14</sup> Podatak dobiven od konstruktora voznog reda HŽ Infrastrukture u programu Roman Planning.

## INTERVAL SLIJEĐENJA



Slika 35: Usporedba prosječnog i dinamički izračunatog rezervnog vremena

U dnevnom intervalu propusnost pruge Zagreb GK – Dugo Selo na kritičnoj dionici Dugo Selo – Sesvete i prema izvještaju o mreži HŽ-a [41] iznosi 209 vlakova. Prema matematički izračunatom modelu propusnost kritične dionice iznosi 226 vlakova (Slika 36).



Slika 36: Predložen taktni vozni red s novim izračunom minimalnog intervala slijeđenja

Da bi funkcionalnost i stabilnost taktnog voznog reda bili postojani, uočeni rizici utjecaja vlakova višeg ranga, koji ulaze u područje gradsko-prigradskog područja sa zakašnjenjem, na

stabilnost voznog reda gradsko-prigradskih vlakova, potrebne su djelomične izmjene organizacije prometa vezane za kategorizaciju vlakova u navedenom području.

Kada se analizirani parametri unesu u izraz (21), predvidljivo kašnjenje iznosi 6,12 minuta po vlakom. U analiziranom razdoblju jutarnjeg vršnog opterećenja, učešće vlakova 1. ranga iznosi 19%, a vlakova 2. ranga 81% dok ponuđeni kapacitet prijevoza u području GPP-a iznosi nešto više od 6.300 putnika/4h.

U istraživanom modelu, u kojem se uvodi takti vozni red u taktu od 10 minuta, gdje samo vlakovi GPP-a sudjeluju u prijevozu putnika u području GPP-a i prilikom otpreme imaju prednost ispred vlakova koji kasne, predvidljivo kašnjenje vlakova GPP-a iznosi 1,84 minute zbog nepredvidljivih tehničkih smetnji prijevoznih sredstava. U navedenom razdoblju učešće u vlakova RP-a i DP-a iznosi 26%, a vlakova GPP-a 74%. Kapacitet prijevoza vlakova GPP-a iznosi 2.790 putnika/h, odnosno, u četiri sata vršnog opterećenja 11.625 putnika, što je povećanje od 46%. U nepovoljnoj epidemiološkoj situaciji s virusom COVID-19 preporuka je Stožera iskorištenje kapaciteta od maksimalno 40%. Kod istraživanog modela, 40% kapaciteta iznosi 4.650 putnika/h što je 73,8% sadašnjih kapaciteta.

## 4.2 Prijedlog izračuna rezervnog vremena

Rezervno vrijeme je dodatak na minimalni interval slijeđenja vlakova koji se uzima u obzir u svrhu smanjenja lančanog prijenosa kašnjenja [42].

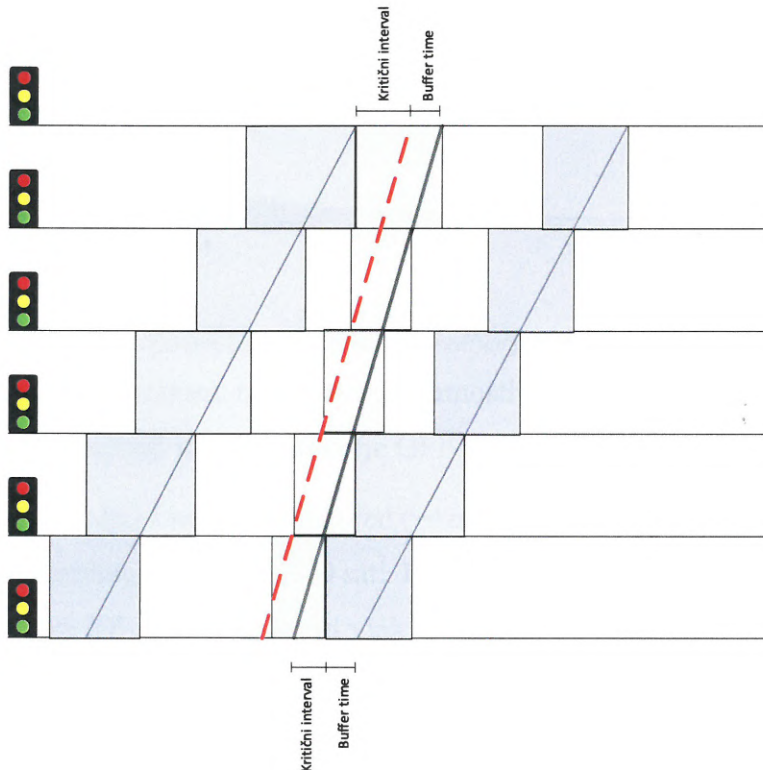
Prilikom izrade voznog reda kao vrijednost rezervnog vremena uzima se fiksno vrijeme kako bi se smanjio međusobni utjecaj vlakova. Ukoliko se vrši izračun rezervnog vremena za 24-satno razdoblje i iskorištenost kapaciteta od 60%, prosječni minimalni interval slijeđenja se množi s 0,67, a ukoliko se izračunava za satni grafikon i iskorištenje kapaciteta od 75%, prosječni minimalni interval slijeđenja se množi s 0,33 [43] izraz (24).

$$t_r = t_s \cdot 0,33 \quad (24)$$

Takva praksa se kod većine željezničkih upravitelja odbacuje zbog povećane iskorištenosti kapaciteta. Kod velikog iskorištenja kapaciteta to predstavlja problem te se pristupa proračunskom modelu izračuna rezervnog vremena za svaki događaj. Na taj način se optimizira vozni red i iskorištenje kapaciteta (Slika 37). U slučaju pojave vlakova koji sa zakašnjenjem ulaze u područje visokofrekventnog prometa, rezervno vrijeme predstavlja parametar stabilnosti voznog reda.

Prema važećoj regulativi vlakovi višeg ranga, u pravilu, prometuju većim maksimalnim brzinama od vlakova nižeg ranga pa su pretpostavljena tri pravila za određivanje rezervnog vremena [44]:

1. Kada je slijedni vlak višeg ranga, rezervno vrijeme je veće.
2. Kada je slijedni vlak nižeg ranga, rezervno vrijeme je minimalno.
3. Kada je slijedni vlak istog ranga, rezervno vrijeme je prosječno.



*Slika 37: Minimalni interval slijeđenja*

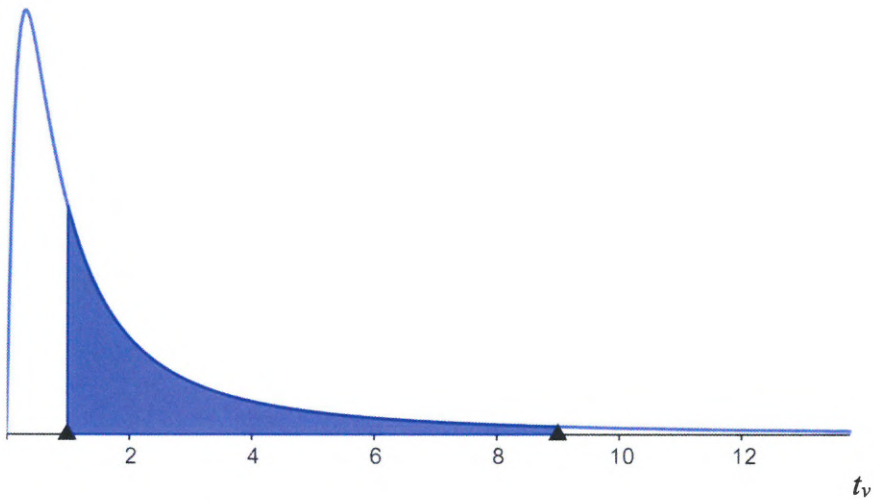
Određivanje dinamičkog rezervnog vremena omogućava optimizaciju iskorištenja kapaciteta infrastrukture bez utjecaja na stabilnost voznog reda.

Procijenjena vrijednost rezervnog vremena u literaturi je kombinacija tri čimbenika:

1. kategorije uzastopnog vlaka
2. određivanja rezervnog vremena prije izračuna vremena vožnje prethodnog vlaka
3. dodatka vremenu vožnje za uzastopni vlak nakon pokretanja prethodnog vlaka.

Ukoliko se uzmu u obzir tri kategorije vlakova prema vremenu putovanja, prema pravilima koja su u većini željezničkih uprava prihvaćene, vrijednost koja se množi s minimalnim intervalom

slijeđenja kod uzastopnih vlakova kraćih vremena vožnje ( $t_v$ ) od prethodnih vlakova ima eksponencijalnu vrijednost (Slika 38).



Slika 38: Dinamička vrijednost za određivanje rezervnog vremena

Prediktivnom analizom dobiveni rezultati vjerojatnosti kašnjenja pokazuju veliki postotak pojave kašnjenja vlakova koji ulaze u područje GPP-a.

Prediktivna analiza se odnosi na novi vozni red (vozni red 2020./2021.), za vremenski interval jutarnjeg vršnog opterećenja 05:00 – 09:00 sati. U tom razdoblju prometuje 11 vlakova GPP-a, šest putničkih vlakova RP-a, jedan ubrzani vlak RP-a i tri vlaka DP-a. Vjerojatnost kašnjenja vlakova koji dolaze u područje GPP-a iznosi 83% s prosječnim kašnjenjem od 10 minuta. Istraživanjem modela izračuna rezervnog vremena, uprosječena vrijednost omogućava da se optimizacijom poveća iskoristivost infrastrukture. Na temelju tih istraživanja moguće je izračunavati rezervno vrijeme kao dinamičku vrijednost ovisnu o odnosu kategorija prethodnog i uzastopnog vlaka uz upotrebu eksponencijalnog izraza (25):

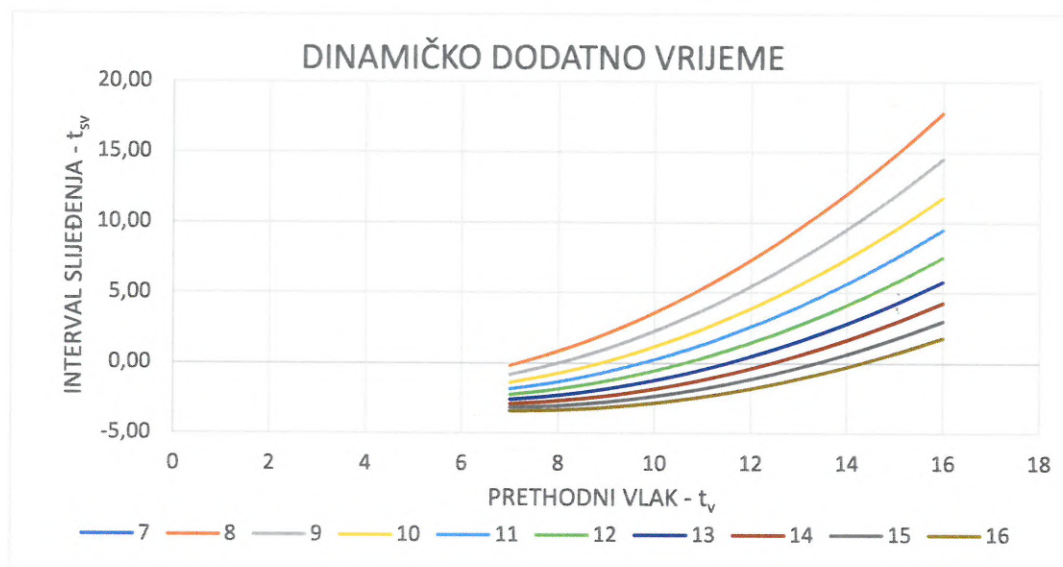
$$t_r = \frac{t_{pi} \cdot \left( t_{pi+1} - e^{-\frac{t_{pi}}{t_{sm}}} \right)}{t_{pj} \cdot \left( 1 + e^{-\frac{t_{pj}}{t_{sm}}} \right)} - t_{pi} [min] \quad (25)$$

gdje su:

- $t_r$  – rezervno vrijeme (min)
- $t_{pi}$  – vrijeme vožnje prethodnog vlaka (min)
- $t_{pj}$  – vrijeme vožnje uzastopnog vlaka (min)

- $t_{sm}$  – prosječni minimalni interval slijeđenja (min).

Kategoriju prethodnog i uzastopnog vlaka predstavlja vremenski interval njihovog prometovanja između dva kolodvora i o njemu ovisi vrijednost rezervnog vremena. Ukoliko je rezultat rezervnog vremena manji od nule, odnosno ukoliko je negativan, tada je rezervno vrijeme jednako nuli. Upotrebom dinamičkog izračuna rezervnog vremena umjesto prosječnog izračuna predloženom metodom UIC405 ili aplikacijskim rješenjem programa Roman, zaokruživanjem na veću vrijednost intervala slijeđenja, optimizira se iskorištenost infrastrukture što doprinosi stabilnosti voznog reda. Povećanje rezervnog vremena odnos je vremena vožnji prethodnog i uzastopnog vlaka (Slika 39).



Slika 39: Rezervno vrijeme prema vremenu vožnje prethodnog i uzastopnog vlaka

Za izračun minimalnog intervala slijeđenja korištena je UIC 405 preporuka na pruzi Zagreb GK – Dugo Selo, na kritičnoj dionici D. Selo – Sesvete. Prosječni minimalni interval slijeđenja ( $t_{sm}$ ) je referentni iznos korišten prilikom izračuna u izrazu (25). Tablica 19 prikazuje izračun rezervnog vremena s obzirom na kategorije putničkih vlakova. Izračun vrijedi za sve kategorije i vrste vlakova koji prometuju na kritičnoj dionici.

Tablica 19: Izračun rezervnog vremena izrazom 25

		PRETHODNI ( $t_{pi}$ )			
		7	8	9	$t_{sm}$
UZASTOPNI ( $t_{pi}$ )	7	0,16	0,84	2,10	3,67
	8	0,00	0,02	1,02	3,67
	9	0,00	0,00	0,13	3,67



Ukoliko je vrijeme vožnje prethodnog vlaka („ $t_{pi}$ “) veće od vremena vožnje uzastopnog vlaka („ $t_{pj}$ “), tada rezervno vrijeme osigurava kvalitetu voznog reda u području kritične dionice i u narednom kolodvoru. Kada je prethodni vlak brži od uzastopnog vlaka, rezervno vrijeme osigurava kvalitetu voznog reda u prethodnom kolodvoru i području kritične dionice.

### **Optimizacijski doprinos upotrebe eksponencijalnog izraza**

Prema predloženom izračunu, minimalni interval slijeđenja se optimizira na način da je umjesto konstantne vrijednosti rezervnog vremena u upotrebi dinamički izračunata vrijednost ovisna o kategorijama prethodnih i uzastopnih vlakova. Tako izračunate vrijednosti minimalnog intervala uzastopnog slijeđenja osiguravaju stabilnost voznog reda i mogućnost definiranja parametara za uvođenje taktnog voznog reda. Predloženi izračun rezervnog vremena povećava propusnost pruge za 8%.

U jutarnjem vršnom intervalu opterećenja od 240 minuta, takav proračun osigurava propusnost za 40 vlakova, u odnosu na relevantnu propusnost od 37 vlakova.

## 5 Simulacijski model

Izrada simulacije postojećeg sustava osigurava detektiranje kritičnih točaka u sustavu. Kritične točke se odnose na vjerojatnost kašnjenja i prosječno kašnjenje s obzirom na vrstu vlaka grupiranih prema sličnim ili istim karakteristikama (maksimalna brzina, relacija putovanja i dnevna učestalost).

Cilj simulacije istraživanog modela je analiza i oblikovanje diskretnih događaja sustava prilagođenog kretanju tokova putnika, pri čemu se naglasak stavlja na sve veće učešće željezničkog prometa u javnom gradsko-prigradskom prometu. Područje istraživanja se odnosi na gradsko-prigradski prijevoz i njegovo područje obuhvata korištenjem vremenskih parametara za određivanje granica. Uvrštavanjem vremenskih parametara u proračune matematičkih modela pokazuje se univerzalnost uvrštavanja u realno okruženje na način da se dobiveni rezultati uvrste u programske alate za simulaciju željezničkog prometa.

Takav model koristi uprosječene podatke kašnjenja i vjerojatnost pojavljivanja zakašnjelog vlaka u području gradsko-prigradskog prometa kada imaju veliki utjecaj na stabilnost voznog reda gradsko-prigradskih vlakova.

Istraživani sustav je područje gradsko-prigradskog prometa s dvokolosiječnom prugom i iskorištenim kapacitetom mješovitog prometa u vršnim satima opterećenja. U navedeno područje se uključuju dva magistralna pravca te je definiran željeznički čvor s jasnim zadacima svakog kolodvora u tom čvoru. Putnički promet je odvojen od teretnog koji je organiziran obilaznim i priključnim prugama čvora.

Simulacijski model koristi postojeću infrastrukturu, a unapređenje se odnosi na tehnologiju organizacije prometa uvođenjem izmijenjenih organizacijskih postupaka, uvođenjem taktnog voznog reda i koncepcijskom podjelom vlakova koji se koriste u svakom od definiranih područja prometa.

Matematički model optimizira korištenje diskretnih sustava, a izrađen je pomoću obojenih neautonomnih Petrijevih mreža u programskom alatu Yasper.

Simulacijski model istražuje se u realnom okruženju kao studija slučaja. Kao referentna dionica za ispitivanje i verificiranje programa korištena je dionica Dugo Selo – Zagreb GK, kao najzahtjevnija dionica na mreži, a uspješnost simulacije je pokazatelj da je simulacijski model primjenjiv na svakom području gradsko-prigradskog prometa u RH.

## 5.1 Petrijeve mreže

Petrijeve mreže su matematički alat za modeliranje i prikazivanje dinamičkih sustava kroz analizu ponašanja sustava u različitim okolnostima [45]. Karakterističnost Petrijevih mreža je mogućnost kombiniranja formalizma i matematičke teorije s grafičkim prikazom dinamičkog ponašanja sustava. Teorijski dio Petrijeve mreže omogućava analizu i modeliranje dinamičkih sustava dok grafički dio omogućava vizualizaciju promjena stanja izrađenog modela.

Teoriju Petrijevih mreža prvi je postavio Carl Adam Petri u svojoj doktorskoj disertaciji 1962. godine [46]. Petrijeve mreže grafički prikazuju i opisuju strukturu sustava kao graf s dvije vrste čvorova, pozicijama (*places*) i tranzicijama (*transitions*) spojenim usmjerenim lukovima (*directed arcs*), a definirane su kao uređena petorka:

$$NE=(P, T, A, w, M_0)$$

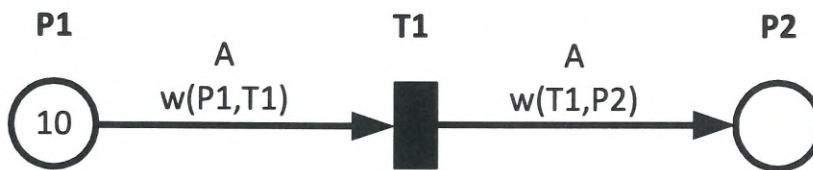
gdje je:

- $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$  – konačan skup pozicija,
- $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$  – konačan skup tranzicija,
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  – konačan skup usmjerenih lukova,
- $w: A \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  – težinska funkcija koja elementu iz skupa  $A$  pridodaje faktor težine luka,
- $M_0$  – početni položaj svakog elementa.

Osim osnovnih pet objekata od kojih se sastoji svaka Petrijeva mreža, moguće je označiti i kapacitete mjesta ( $K$ ).

Jedan objekt se ne može nalaziti u dva različita skupa te između dva objekta u različitim skupovima može postojati relacijski tok koji se prikazuje lukom  $A$ . Pozicijama se dodjeljuju dva prirodna broja  $K$  i  $M_0$ , a lukovima prirodni broj. U primjeni se koriste pozicije koja mogu sadržavati jedan ili više elementa (tokena). Koliko elemenata može sadržavati pozicija, označava kapacitet  $K$ , a koliko stvarno sadrži pokazuje broj elemenata  $M$ . Za razliku od pozicija, tranzicije nemaju dodatne parametre i predstavljaju aktivne elemente jer kao okidači mijenjaju raspored elemenata na pozicijama. Uz lukove se upisuje faktor koji označava težinu luka.

Grafički prikaz Petrijeve mreže sadrži krugove, pravokutnike i strelice (Slika 40). Krugovi označavaju pozicije (P), pravokutnici tranzicije, odnosno mjesta u kojima se aktivira neki proces (T), dok strelice predstavljaju lukove (A).



Slika 40: Osnovni grafički elementi Petrijeve mreže

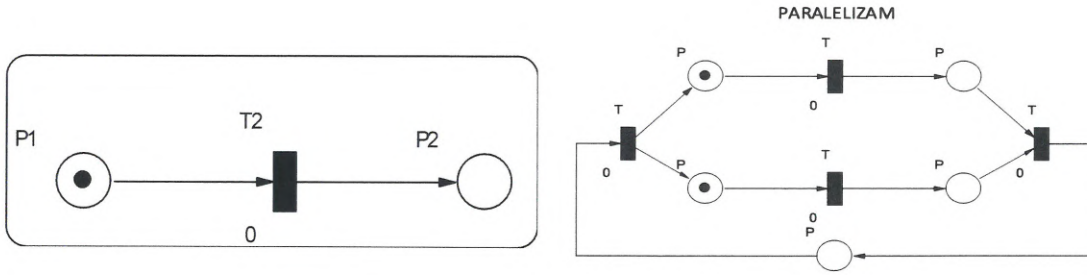
Broj elemenata u svakom mjestu se označava točkama, a ukoliko postoji veliki broj elemenata, tada se unutar kruga koji označava mjesto upisuje broj.

Tekstualni opis grafičkog prikaza na slici 40 možemo napisati:

- $P = \{p_1, p_2\}$
- $T = \{t_1\}$
- $A = \{(p_1, t_1), (t_1, p_2)\}$
- $w = \{((p_1, t_1), 1), ((t_1, p_2), 1)\}$
- $K = \{(p_1, \infty), (p_2, \infty)\}$
- $M_0 = \{(p_1, 10), (p_2, 0)\}$

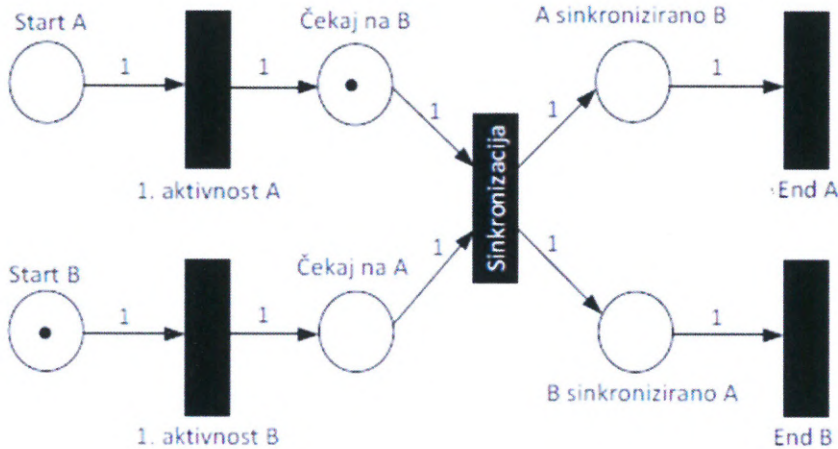
Prilikom crtanja grafičkog prikaza moguće je procese svrstati u područja ispred ili iza čvora, odnosno okidača, te samo izvršenje (okidanje) procesa. Slijed izvršenja procesa može biti prikazan sekvencom ili paralelizmom. U slučaju prikaza sekvence u procesu  $A \rightarrow B \rightarrow C$  znači da se prvo odvija proces A, zatim B i na kraju C. U Petrijevim mrežama oznake izvršenja procesa (A, B, C) postaju tranzicije, a između njih se umeću pozicije novog stanja procesa.

U slučaju odvijanja dviju ili više sekvenci nezavisnih jedne o drugima, u grafičkom prikazu dolazi do razdvajanja procesa i paralelizma. Kada dva ili više paralelnih procesa imaju zajedničku tranziciju, dolazi do njihovog spajanja (Slika 41).



Slika 41: Sekvenca i paralelizam

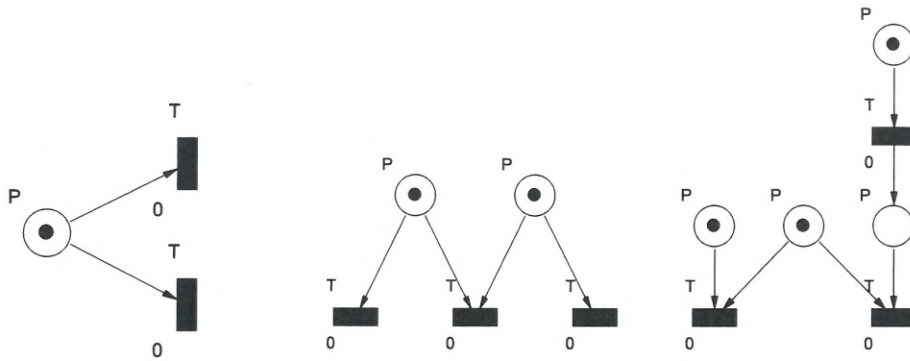
U složenim procesima dolazi do situacija kada se u međusobno nezavisnim procesima za nastavak aktivnosti koriste međurezultati nekog drugog nezavisnog procesa. U takvom tranzicijskom mjestu aktivnost se ne nastavlja dok svi procesi, koji moraju biti usklađeni, ne stignu do točke usklađenja (Slika 42).



Slika 42: Grafički prikaz usklađenja [Izvor: [45]]

Razlika između sekvence i paralelizma je u tome da u slučaju sekvence u jednom trenutku se odvija samo jedna tranzicija dok u paralelizmu se u jednom trenutku odvija više tranzicijskih aktivnosti.

Prilikom odvijanja procesa dolazi do mogućih konflikata u procesima, najčešće kada dvije sekvence pokušaju aktivirati nešto što se međusobno isključuje. Konflikt ne mora biti greška sustava već može biti prikaz odabira jedne između više mogućnosti. Ukoliko se neka aktivnost nalazi u konfliktu s više aktivnosti, tada govorimo o konfuziji (Slika 43).



Slika 43: Konflikt i konfuzija [Izvor: [45]]

U aktiviranju organizacijskih procesa Petrijeve mreže pružaju mogućnost modeliranja dizajna i analize procesa na apstraktnoj razini.

Petrijeve mreže mogu se podijeliti na autonomne i neautonomne Petrijeve mreže. Kod sustava i procesa gdje se promjene stanja sustava izvršavaju autonomno, nevezano uz vanjske događaje, koristimo autonomne Petrijeve mreže. Kod procesa koji su vezani uz neku vanjsku akciju ili događaj, isti se modeliraju neautonomnim Petrijevim mrežama.

S obzirom na kompleksnost diskretnog modela koji se opisuje u radu, za modeliranje se koriste vremenske Petrijeve mreže.

Vremenske Petrijeve mreže kod simuliranih diskretnih modela ukazuju na sve konflikte koji nastaju te omogućavaju izradu optimalnog modela primjenjivog u realnom okruženju.

Kako željeznički sustav spada u dinamičke sustave s diskretnim događajima, analiza takvih sustava pomoću Petrijevih mreža u potpunosti definira strukturu, konfliktna stanja, stanja zastoja i vremenske odnose diskretnih stanja prometnog procesa.

## 5.2 Izrada simulacijskog modela

Proces integriranog taktnog voznog reda u kolodvoru, u svrhu povećanja optimizacije iskorištenja kolodvorskih kolosijeka određivanjem ulazno-prijemnih kolosijeka, dopuna je istraživanja taktnog prometa na određenoj relaciji. Metodologija prikazana matematičkim formalizmom Petrijeve mreže za postizanje uvjeta implementacije integriranog taktnog voznog reda u stvarni sustav služi kao tehnološko rješenje produžetka prometa s otvorene pruge na kolodvorsko područje.

Istraživanjem i modeliranjem simulacijskih metoda dokazuje se visoka stopa stabilnosti i planiranja voznog reda, na osnovi izrađivanih simulacijskih računalnih modela, koji dokazuju izvedivost i dostupnost modela koji bi bili poveznica dispečerskih područja ili područja drugih

željezničkih uprava. Nije moguće u potpunosti implementirati takav model kod nepostojanja središnjeg upravljanja prometom [47]. Međutim, svaka parcijalna implementacija povećava kapacitete prijevoza i podiže kvalitetu usluge [48, 49, 50].

Ispitivanje modela provedeno je obojenim neautonomnim Petrijevim mrežama s korištenjem kontrolora slobodnosti automatskog pružnog bloka (APB) [51, 52]. U modelu je predviđena specifičnost sustava u realnom okruženju, primjer kolodvorskih kolosijeka kolodvora Zagreb Borongaj kao nastavak otvorene pruge te njihova specifična duljina. U području kolodvora pozicionirana su tri stajališta. Na relaciji Dugo Selo – Zagreb GK prisutna je razlika u voznim vremenima tri vrste vlakova u putničkom prometu. Kod navedenih vlakova razlika je i u maksimalnim brzinama na dijelovima navedene relacije.

Prilikom izrade modela Petrijevim mrežama mjesta su određivana prema svakoj promjeni brzine. Mjesta na mreži su:

- mjesta pokretanja vlaka
- glavni signali
- mjesta zaustavljanja vlaka
- mjesta promjene brzine (početak i kraj usporene brzine).

Glavni signali su mjesta u Petrijevim mrežama zbog toga što u jednom prostornom odsjeku između dva glavna signala na otvorenoj pruzi može biti samo jedan vlak.

Ukoliko navedene parametre uvrstimo u područje GPP-a Zagreba na relaciji Dugo Selo – Zagreb GK, mjesta čine:

- $P = \{ \text{kolodvor obrta (Dugo Selo), izlazni signal (D. Selo), glavni signal 502, glavni signal 512, glavni signal 522, stajalište S. Kraljevec, glavni signal 532, glavni signal 542, glavni signal 552, glavni signal A (Sesvete), kolodvor Sesvete, glavni signal E (Sesvete), glavni signal 562, glavni signal 572, glavni signal AT(Borongaj), stajalište Čulinec, glavni signal K (Borongaj), stajalište Trnava, glavni signal F (Borongaj), stajalište Maksimir, glavni signal H (Borongaj), glavni signal 582, glavni signal G (GK)} \}$

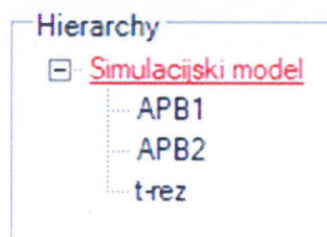
Za detaljnije vremenske parametre mogu se ugraditi dodatna mjesta promjene brzine:

- promjena brzine (60→120), promjena brzine (120→100), promjena brzine (100→120), promjena brzine (120→60), promjena brzine (60→120), promjena brzine (120→80), promjena brzine (80→50).

Za izradu simulacijskog modela koristit će se aplikacija Yasper. Osim što je moguće modelirati i prikazivati mjesta, lukove i tranzicije, u navedenoj aplikaciji su moguće dodatne postavke:

- hijerarhija („hierarchy“- engl.)
- izbor (XOR)
- role („roles“- engl.)
- simulacija
- inhibitorski povratni lukovi
- pohrana
- vrijeme, trošak i vjerojatnost
- identitet slučaja, emiteri i kolektori
- automatska simulacija.

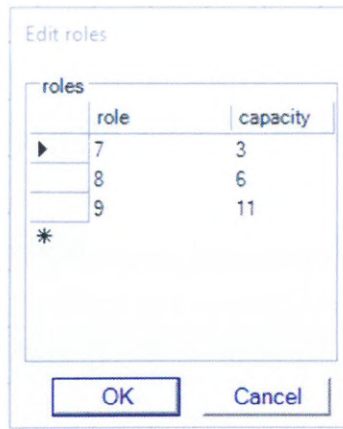
Hijerarhija omogućuje podjelu mreže po podmrežama. Pozicije gdje se svaka podmreža povezuje na ulazu i izlazu s glavnom mrežom daje jasan pregled određenih akcija koje se detaljno simuliraju u podmreži (Slika 44).



Slika 44: Hijerarhijska mreža

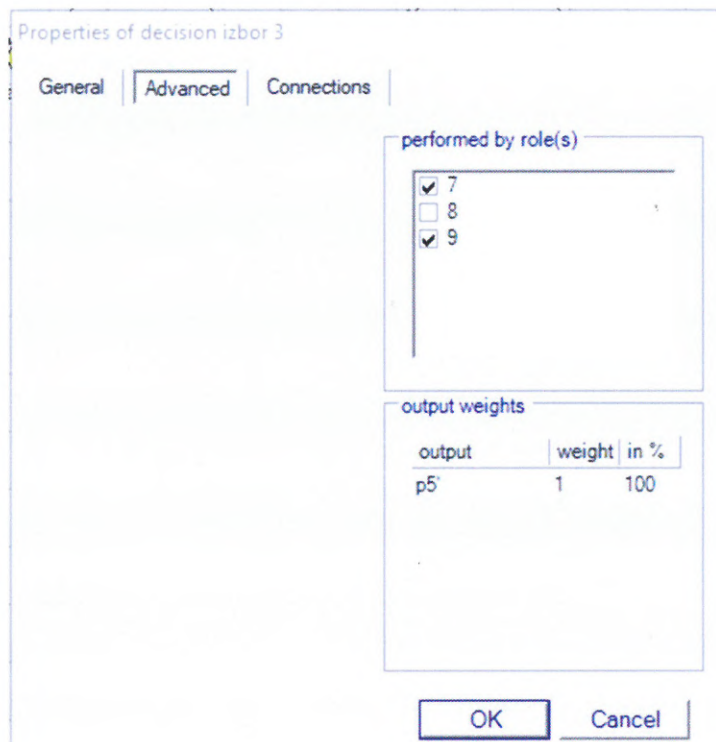
Role su skup pozicija koja izvršavaju određenu akciju te se u njima mjere izlazni parametri, a u simulaciji su prikazane u tranzicijama gdje se mogu izvršiti (Slika 45).





Slika 45: Dodjeljivanje rola

Izbor (XOR) se označava kao simbol romba u aplikaciji, a označava mjesto alternativnih sekvenci koje su definirane dodijeljenim rolama (slika 46).



Slika 46: XOR definiranje izbora aktivnosti

Simulacija mjeri iskorištenost dodijeljenih rola prema zadanom postotku učešća u simulaciji što omogućava analizu iskorištenosti vremena prema dodijeljenim rolama.

Inhibitorski i povratni lukovi su korisni za ispitivanje i kontrolu stanja mjesta u trenutku aktivnosti ili pred samu aktivnost.

Pohrana označava pozicije koja uvijek imaju jedan element (token), a predstavljaju bazu podataka i povezani su s tranzicijama kroz dvostruke lukove.

Vrijeme, trošak i vjerojatnost služe kao podrška stohastičkoj simulaciji. Tranzicije mogu biti vremenski određene ili s odgodom. Vremenskim tranzicijama se može dodijeliti srednja vrijednost vremena i standardna devijacija pri čemu se vrijeme određuje slučajnom gama razdiobom. Uz navedeno, svaka tranzicija može sadržavati i trošak izvršenja, a sastoji se od fiksnog i promjenjivog troška po jedinici vremena. U simulacijskom modelu nisu navedeni troškovi zbog nemogućnosti definiranja troškova vlakova nastalih njihovim kašnjenjem. Težina aktivnosti se dodjeljuje odlaznim lukovima ovisno o odluci koji će luk biti izabran tijekom izvođenja simulacije (Slika 47).

The image shows a software dialog box titled "Properties of task k1" with three tabs: "General", "Advanced", and "Connections". The "Advanced" tab is active. It contains two main sections: "work time" and "processing cost".

- work time:** "Mean:" is set to 1, and "Deviation:" is set to 0.
- processing cost:** "Fixed:" is set to 0, and "Per time unit:" is set to 0.
- performed by role(s):** A list of roles with checkboxes: role 7 is unchecked, role 8 is checked, and role 9 is unchecked.

At the bottom right, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Slika 47: Vrijeme, trošak i vjerojatnost učešća rola

Identitet slučaja, emiteri i kolektori se koriste za ručno pokretanje simulacijskih procesa ili automatsko simuliranje cjelokupnog procesa. Tijekom izvršenja procesi započinju u emiterima, rješavaju se neovisno, prolaze kroz prijelaze i „case sensitive“ pozicije te završavaju u kolektorima.

Emiteri („E“) su mjesta u kojima se generiraju elementi (tokeni) koji imaju pridruženi broj, tzv. obojeni elementi (tokeni). Prema tom broju „case sensitive“ pozicije razlikuju elemente (tokene) u mreži. Elementi (tokeni) iz „case sensitive“ pozicija moraju biti prihvaćeni u „case sensitive“ tranzicijama. „Case sensitive“ pozicije su žuto obojane pozicije koja razlikuju elemente (tokene), a razlikuju se od „case insensitive“ pozicija po boji.

U kolektorima („C“) se nakupljaju i broje obojeni elementi (tokeni).

Automatska simulacija bilježi ispravan završetak pojedinačnih slučajeva i daje statističku analizu o izvršenju procesa u okviru izvršenja simulacije. Rezultati se prikazuju zbirno, prosječno po svim slučajevima ili pojedinačno po slučaju. Uz navedeno, prikazuju postotno iskorištenje zauzeća vremena za svaku ulogu.

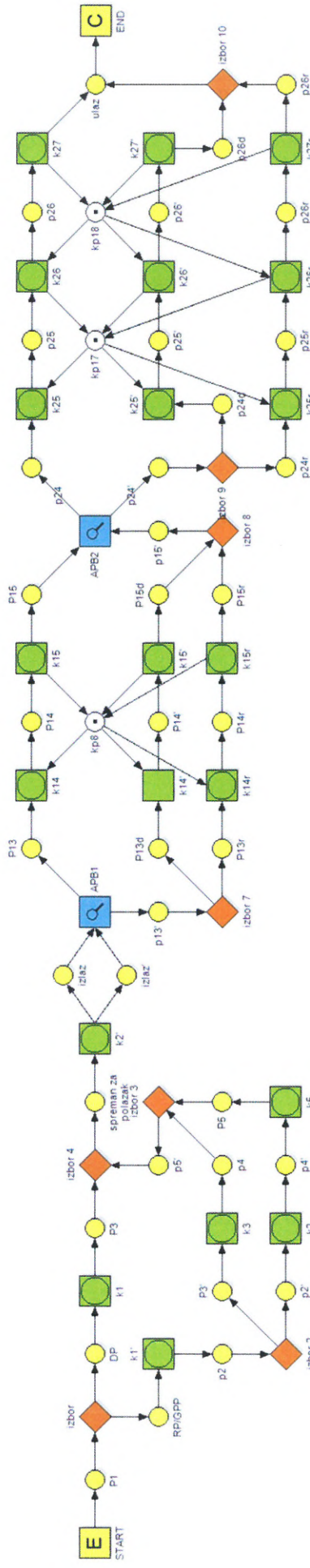
Simulacijski model je izrađen pozicioniranjem mjesta na granicama blokovnih odsjeka i mjesta na kojima su moguće nekakve aktivnosti. To su prije svega glavni signali na pruzi i kolodvorima koji prenose informaciju strojnom osoblju o stanju infrastrukture iza signala, koji mogu utjecati na usporenje brzine vožnje do zaustavljanja. Pozicije stajališta su opcije za vlakove koji se zaustavljaju na tim pozicijama, a za ostale vlakove su dio otvorene pruge gdje je brzina ograničena maksimalno dopuštenom na tom dijelu pruge.

Tranzicije su vremenski uvjetovani okidači određenih radnji za koje je potreban određen vremenski interval (ulazak ili izlazak putnika, prolazak blokovnog odsjeka i sl.).

U izradi modela neke vremenske komponente su definirane, a to su: vrijeme bavljenja vlakova GPP-a na stajalištima (u simuliranom modelu iznose 0,5 minuta po stajalištu), vremena usporenja i ubrzanja na mjestima zaustavljanja prema akceleracijskim karakteristikama vlakova. Tehničke karakteristike novih niskopodnih elektromotornih garnitura osiguravaju akceleraciju koja iznosi  $1\text{m/s}^2$  kod ubrzanja i  $1,3\text{m/s}^2$  prilikom usporenja.

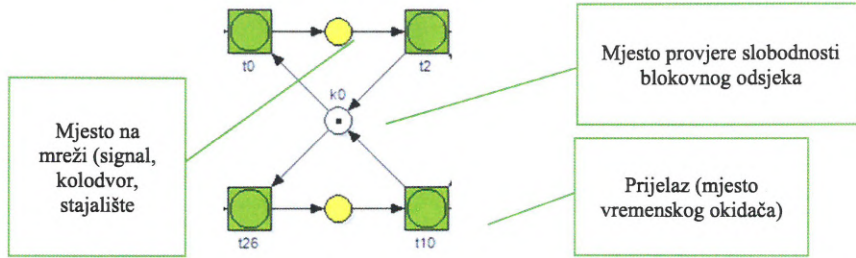
Sastavljanjem studije slučaja Petrijevim mrežama na promatranoj dionici nastao je matematički model (Slika 48) koji je moguće podijeliti na pet cjelina i to:

- područje obrtnog kolodvora – razlike u donošenju odluke o pokretanju vlaka
- područje pruge od obrtnog do narednog kolodvora u kojem je moguće pretjecanje vlakova
- područje kolodvora – donošenje odluke o redoslijedu otpreme vlakova
- područje pruge do drugog kolodvora u kojem je moguće pretjecanje
- područje kolodvora u kojem nije moguće pretjecanje vlakova.



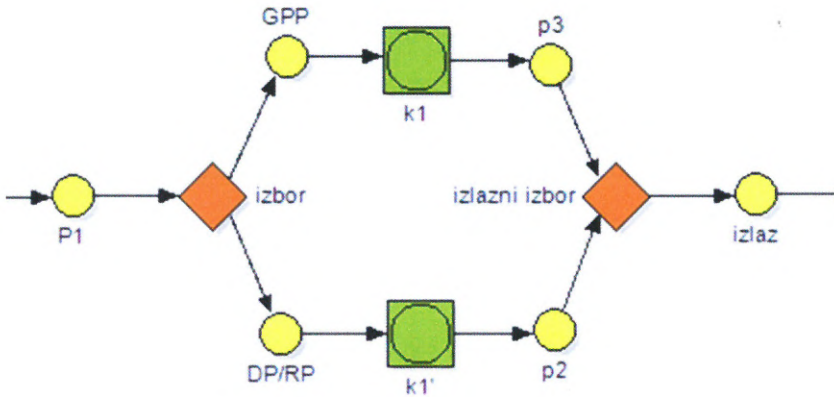
Slika 48. Studija slučaja prikazana Petrijevim mrežama

Sa sigurnosnog aspekta, a prema važećim propisima, u jednom blokovnom odsjeku smije biti samo jedan vlak. Takvu sigurnosnu provjeru slobodnosti blokovnog odsjeka vrši „kontrolor“ ( $k_p$ ) [53, 54] te je u model uvršteno kontrolno mjesto za provjeru slobodnosti svakog blokovnog odsjeka (Slika 49).



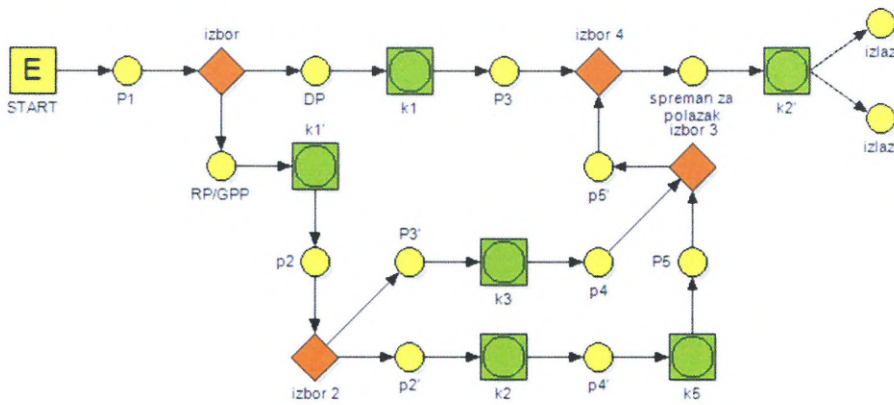
Slika 49: Pozicioniranje „kontrolora“ slobodnosti blokovnog odsjeka

U alatu za izradu simulacijskog modela Yasper, na mjestima gdje postoji alternativna aktivnost, koristi se XOR oznaka koja omogućava aktivnost koja ima prioritet prilikom aktivacije (Slika 50):



Slika 50: Upotreba elementa XOR u izradi modela

U kolodvoru obrta gradsko-prigradskog prometa određeni su uvjeti koji moraju biti zadovoljeni da bi se vlak mogao pokrenuti. Prilikom izrade voznog reda konstruktori voznog reda se moraju pridržavati pravila, dok u simulacijskom modelu područje kolodvora ima drugačiju strukturu (Slika 51).



Slika 51: Model otpreme vlakova iz obrtnog kolodvora u studiji slučaja

Ukoliko ima više vlakova u kolodvoru, prilikom pokretanja vlaka iz kolodvora utvrđuje se koji vlak je višeg ranga. Vlak višeg ranga ima prioritet prilikom otpreme. Nakon toga se utvrđuje slobodnost prvog blokovnog odsjeka. U kolodvoru svaka radnja prilikom otpreme vlaka se određuje s „Ako-Onda-Inače“ pravilima propisanim postupkom. Ukoliko postoje odstupanja u izvršenju voznog reda, dolazi do narušavanja stabilnosti voznog reda. Organizacija izvršenja tehnoloških procesa se tada izvršava točno propisanim pravilima.

Svaki postupak proveden kod izvođenja tehnološkog procesa može se pojednostavniti odlukama „DA-NE“, odnosno postupak može biti „0 – 1“, što dovodi do situacije da je cijeli postupak moguće prikazati i cjelobrojnim linearnim programiranjem.

U području obrtnog kolodvora donose se odluke o redosljedju pokretanja vlakova kojima je to početni kolodvor i vlakova kojima je to prolazni kolodvor na njihovoj relaciji prometovanja. Moguće su dvije akcije odlaska vlaka iz kolodvora kada se radi o dva vlaka u kolodvoru koja su spremna za polazak u istom smjeru. Ukoliko se radi o dva vlaka istog ranga, vrijedi pravilo „FI-FO“ – prvi koji je došao, prvi odlazi. Ukoliko se radi o dva vlaka različitih rangova tada prvi odlazi iz kolodvora vlak višeg, a zatim vlak nižeg ranga. Zbog navedenih organizacijskih postupaka provedena je analiza utjecaja zakašnjelih vlakova višeg ranga na stabilnost voznog reda vlakova nižeg ranga. Prema zaključku iz provedenih analiza o vjerojatnosti kašnjenja vlakova višeg ranga te njihovom prosječnom kašnjenju, u velikoj mjeri je narušena stabilnost voznog reda vlakova nižeg ranga, a u ovom slučaju su to vlakovi gradsko-prigradskog prometa.

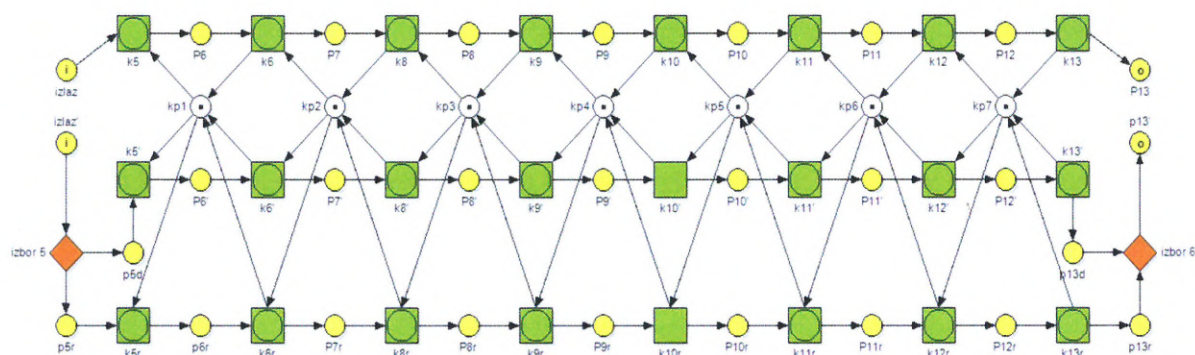
Područje pruge između dva kolodvora ograničeno je svojom propusnošću koja ovisi o stanju infrastrukture i ugrađenim signalno-sigurnosnim uređajima. Tehnološki izračuni prosječnog

minimalnog intervala slijeđenja vlakova uvjet su nesmetanog odvijanja prometa na pruzi između dva kolodvora (Slika 52).



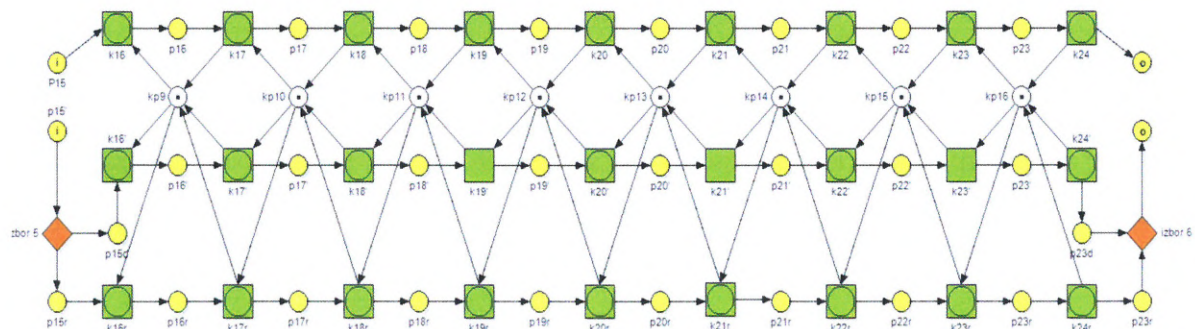
Slika 52: Područje otvorene pruge između dva kolodvora

U aplikaciji za izradu simulacijskog modela područje pruge prikazano na slici 51 grafički je prikazano na Slika 53.



Slika 53: Područje pruge između dva kolodvora

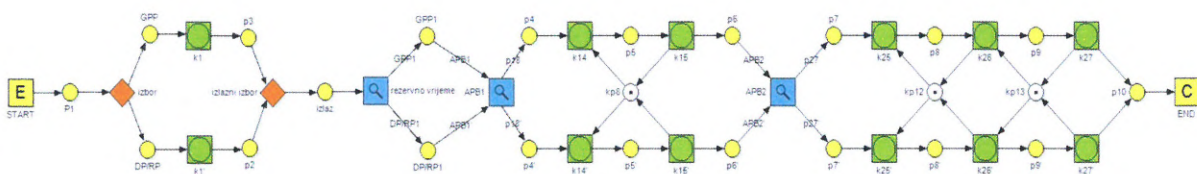
Područje kolodvora u kojem nije moguće pretjecanje vlakova ima karakteristike otvorene pruge te se vlakovi otpremaju u blokovnom razmaku (Slika 54). Takvih kolodvora u području zagrebačkog željezničkog čvora ima više: Zagreb Borongaj, Zagreb Klara i Podsused TV. Odnosi se samo na kolodvore koji se nalaze na prugama otvorenim za putnički promet.



Slika 54: Područje kolodvora u kojem nije moguće pretjecanje vlakova

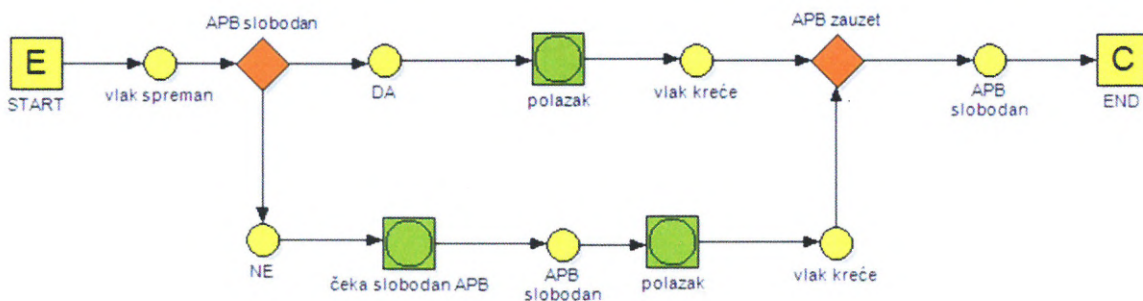
Razlika između prikazanih modela na slikama 53 i 54 je u tranzicijama kojima se definira stajanje na određenim pozicijama ili prolaz (primjer zaustavljanja vlaka na stajalištu).

Primjenom simulacijskog modela, uz popratne promjene u organizacijskom dijelu, povećava se kapacitet prijevoza putnika uvođenjem većeg broja vlakova GPP-a koji prometuju u taktном voznom redu. Simulacijski model, prema kojem je u svakom kolodvoru moguće pretjecanje, zahtijeva manji broj kontrolora i pojednostavljeni izbor prilikom otpreme vlaka uz efikasniji utjecaj na stabilnost voznog reda (Slika 55).



Slika 55: Istraživani simulacijski model

Razlika u kolodvoru obrta između studije slučaja i istraživanog modela je u rangiranju vlakova. U istraživanom modelu vlakovi GPP-a imaju prednost ispred vlakova koji kasne prilikom otpreme iz obrtnog kolodvora pa se na taj način ne narušava stabilnost njihovog voznog reda zbog vjerojatnosti kašnjenja vlakova u tranzitu (Slika 56).



Slika 56: Simulacijski model otpreme vlaka u obrtnom kolodvoru

Nakon izbora vlaka koji se može pokrenuti iz kolodvora, provjerava se slobodnost prostornih odsjeka pruge između dva kolodvora. Ukoliko nema vlakova na navedenoj dionici ili su prva dva blokovna odsjeka slobodna, vlak može napustiti kolodvor odmah. U slučaju otpreme uzastopnog vlaka, s vremenskim odmakom prilikom otpreme, moguća su dva izračuna intervala minimalnog uzastopnog slijeđenja i to:

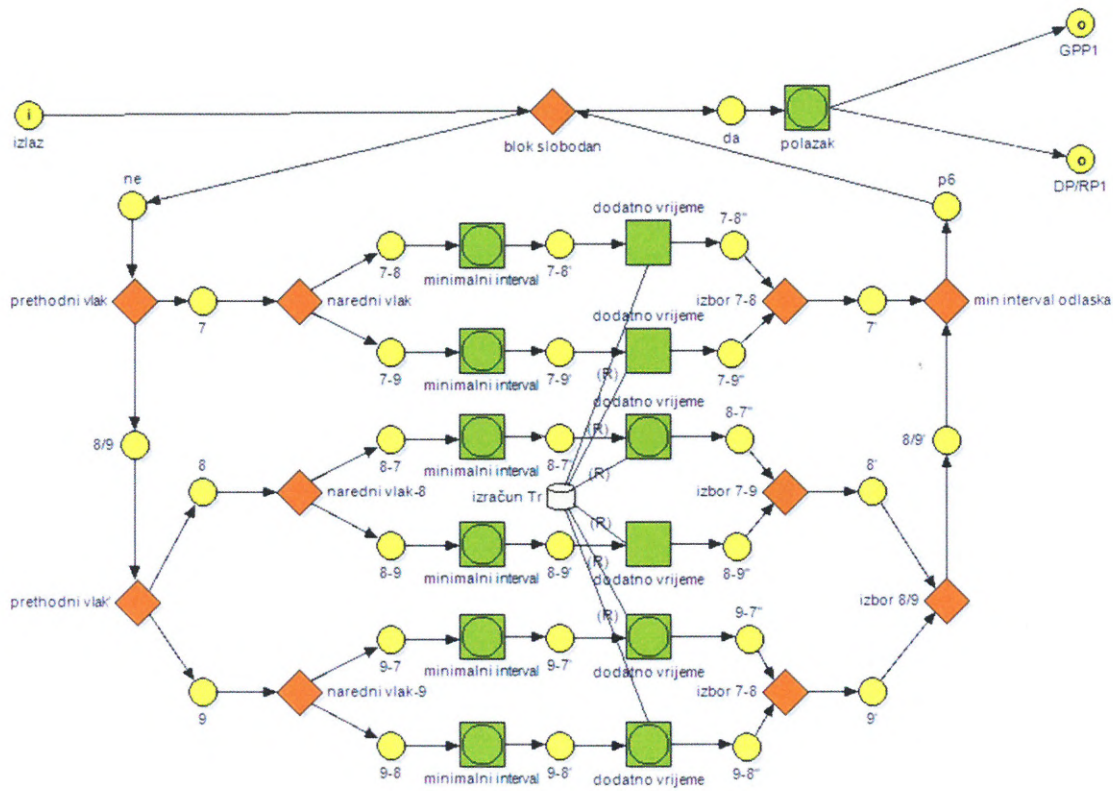
- prosječni minimalni interval slijeđenja i dodatno vrijeme ( $T=t_{ps} + t_d$ )



- prosječni minimalni interval slijeđenja, dodatno vrijeme i rezervno vrijeme ( $T = t_{ps} + t_d + t_r$ ).

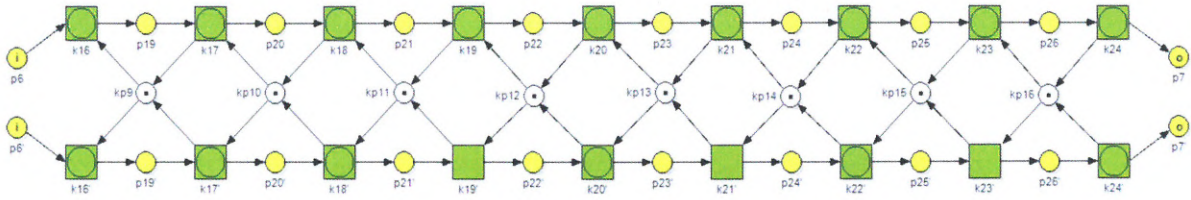
U prvom slučaju kada je interval slijeđenja zbroj prosječnog minimalnog intervala slijeđenja i dodatnog vremena, radi se o situaciji kada je prethodni vlak brži od uzastopnog vlaka.

U drugom slučaju, kada je interval slijeđenja zbroj minimalnog prosječnog intervala slijeđenja te dodatnog i rezervnog vremena, radi se o situacijama kada je prethodni vlak iste brzine ili sporiji od uzastopnog vlaka. Aplikacijsko rješenje prikazuje Slika 57.



Slika 57: Prikaz postupka izračuna rezervnog vremena prilikom otpreme uzastopnog vlaka

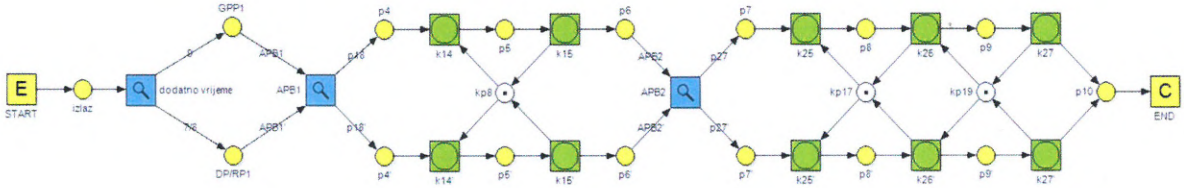
Područje kolodvora u kojem nije moguće pretjecanje vlakova može se izjednačiti s prugom između dva kolodvora. Tehnički je moguće povećati propusnost pruge i smanjiti međusobni utjecaj vlakova prilikom izvršenja voznog reda ulaganjem u dogradnju infrastrukture. Specifičnost duljine kolodvorskog područja i broja stajališta u tom području, kao na primjeru kolodvora Zagreb Borongaj, u simulacijskom modelu omogućava vlakovima većih komercijalnih brzina pretjecanje vlakova manjih komercijalnih brzina bez utjecaja na njihovo kretanje unutar takvog kolodvorskog područja (Slika 58). Zbog sigurnosnog aspekta bitna je informacija je li blokovni odsjek zauzet ili nije. Zbog toga su mjesta koja kontroliraju zauzeće „case insensitive“ mjesta, jer nije bitno koji konkretan vlak je zauzeo blokovni odsjek.



Slika 58: Područje kolodvora s minimalnim infrastrukturnim zahvatima

Alat za izradu simulacija u Petrijevim mrežama, Yasper, daje mogućnost uvjetovanog simuliranja. Uvjetno simuliranje u području kolodvora daje mogućnost izbora u situacijama kada se u kolodvoru nalaze dva vlaka ili više njih, a odnosi se na izbor redoslijeda otpreme vlakova prema propisanom postupku.

Analiza simulacijskog modela, prema kojem je organizacijski omogućen takti vozni red i redovitost vlakova gradsko-prigradskog prometa zbog smanjenja utjecaja vlakova višeg ranga (Slika 59) daje rezultate kojima se stabilnost voznog reda osigurala, a kašnjenja vlakova u organizaciji prometa smanjena su na prihvatljivu razinu.



Slika 59: Simulacijski model istraživane dionice

### 5.3 Testiranje modela

Analizom izvršenja voznog reda na studiji slučaja gradsko-prigradskog prometa Grada Zagreba u tromjesečnom vremenskom intervalu, u koji su uključeni prethodni i važeći vozni red (2019/20. i 2020/21.) uz prosječnu vjerojatnost kašnjenja vlakova (devijacija u vrijednosti 10 minuta), čekanja vlakova s obzirom na rangiranje pokazuju prosjek čekanja vlakova na pretjecanje 21,28 minuta.

Vlakovi koji prometuju na modelu studije slučaja podijeljeni su u tri kategorije kako bi se mogli usporediti s kategorijama simulacijskih vlakova (Tablica 20).

Tablica 20: Vrste vlakova u modelu studije slučaja

rolename	% busy
prigradski	98,37
brzi	58,25
ubr./put.	52,9

Utjecaj vlakova višeg ranga na stabilnost voznih redova ostalih vlakova vidljiv je u Tablica 21 koja je sastavljena prema izrađenom modelu studije slučaja s istim brojem signala, stajališta i važećim brzinama na relaciji Dugo Selo – Zagreb GK. „START“ je u kolodvoru Dugo Selo, a „END“ u Zagreb GK. Kolona „COMPLETED“ potvrđuje je li simulirani vlak izvršio vožnju u potpunosti. U koloni „wait time“ su prikazana sva akumulirana čekanja na prosječnu devijaciju u poštivanju vremena voznog reda vlakova višeg ranga.

Tablica 21: Analiza studije slučaja gradsko-prigradskog prometa Grada Zagreba [Yasper]

CASE	FROM	TO	COMPLETED?	WAIT TIME	CYCLE TIME	WORK TIME
1	START	END	yes	0	28,47	44,93
2	START	END	yes	10,26	56,1	64,54
3	START	END	yes	13,42	56,47	58,06
4	START	END	yes	20,54	63,59	44,93
5	START	END	yes	43,87	90,39	63,06
6	START	END	yes	28,88	79,81	50,93
7	START	END	yes	41,05	87,46	46,41
8	START	END	yes	39,93	84,86	44,93
9	START	END	yes	35,69	93,75	58,06
10	START	END	yes	40,54	92,6	52,06
11	START	END	yes	43,27	101,33	58,06
12	START	END	yes	46,64	98,7	52,06
13	START	END	yes	55,76	100,69	44,93
14	START	END	yes	60,35	107,9	47,55
15	START	END	yes	37,11	95,29	58,18
16	START	END	yes	45,14	98,36	53,22
17	START	END	yes	49,2	100,15	50,95
18	START	END	yes	51,69	106,43	54,74
19	START	END	yes	55,97	108,03	52,06
20	START	END	yes	63,85	108,78	44,93
21	START	END	yes	67,28	119,34	52,06
22	START	END	yes	85,01	131,42	46,41
23	START	END	yes	93,62	140,03	46,41
24	START	END	yes	97,1	149,16	52,06
25	START	END	yes	119,56	171,39	61,06
26	START	END	yes	126,81	179,97	55,93
27	START	END	no	138,25	20,24	20,24
28	START	END	no	118,93	21,15	20,25
29	START	END	no	101,01	27,94	20,23
30	START	END	no	89,69	24,97	20,23
31	START	izbor	no	80,69	0	0

32	START	END	no	20,81	45,83	33,36
33	START	izbor	no	14,35	30,36	18,15
34	START	k10r	no	1,06	10,08	10,04
35	START	(null)	no	0	0	0

Osim zakašnjenja s kojim su stigli u analizirano područje, pojavljuju se i zakašnjenja ostalih vlakova nižeg ranga koji čekaju na pretjecanje u kolodvoru obrta. U simulacijskom modelu vlakovi su podijeljeni u dvije kategorije (Tablica 22). Svaka kategorija ima točno definirano područje određeno osnovnim karakteristikama za područje na kojem prometuju.

Tablica 22: Definirane role (klasifikacija vlakova) u simulacijskom modelu

rolename	%bussy
DP/RP	4,62
GPP	3,23

Organizacija prometa na predloženi način osigurava stabilnost voznog reda. Devijacija se odnosi samo na vlakove koji ulaze u područje gradsko-prigradskog prometa, a koji nemaju utjecaj na stabilnost vlakova gradsko-prigradskog prometa (Tablica 23).

Tablica 23: Analiza stabilnosti voznog reda simulacijskog modela [Analiza iz programa Yasper]

CASE	FROM	TO	COMPLETED?	WAIT TIME	CYCLE TIME	WORK TIME
103	START	END	yes	0	27,56	27,56
104	START	END	yes	0	35,62	35,62
105	START	END	yes	0	27,56	27,56
106	START	END	yes	0	30,41	30,41
107	START	END	yes	0	25,7	25,7
108	START	END	yes	0	25,7	25,7
109	START	END	yes	0	20,75	20,75
110	START	END	yes	0	36,57	26,57
111	START	END	yes	0	22,26	22,26
112	START	END	yes	0	57,56	27,56
113	START	END	yes	0	32,51	32,51
114	START	END	yes	0	27,56	27,56
115	START	END	yes	0	19,75	19,75
116	START	END	yes	0	27,56	27,56
117	START	END	yes	0	20,75	20,75
118	START	END	yes	0	24,62	24,62
119	START	END	yes	0	27,56	27,56

120	START	END	yes	0	31,51	31,51
121	START	END	yes	0	31,51	31,51
122	START	END	yes	0	32,51	32,51
123	START	END	yes	0	20,75	20,75
124	START	END	yes	0	24,7	24,7
125	START	END	yes	0	20,75	20,75
126	START	END	yes	0	31,51	31,51
127	START	END	yes	0	20,75	20,75
128	START	END	yes	0	20,75	20,75
129	START	END	yes	0	20,75	20,75
130	START	END	yes	0	27,56	27,56
131	START	END	yes	0	30,41	30,41
132	START	END	yes	0	24,71	24,71
133	START	END	yes	0	19,75	19,75
134	START	END	yes	0	20,75	20,75
135	START	END	yes	0	20,75	20,75
136	START	END	yes	0	27,56	27,56
137	START	END	yes	0	25,7	25,7
138	START	START	no	0	0	0

Prema prikazanoj tablici svi vlakovi koji su modelom predviđeni da prometuju (35 vlakova), završili su započetu vožnju uz veliku razliku u akumuliranim zakašnjenjima. Ni jedan vlak na ovakav način organizacije ne akumulira zakašnjenja, što je vidljivo u koloni „wait time“ gdje je za sve vlakove rezultat 0. Organizacijski, predloženi model simuliran Petrijevim mrežama pokazuje da stabilnost voznog reda nije narušena kod nijednog vlaka.

#### **5.4 Funkcionalnost simulacijskog modela u dokazivanju optimizacije i stabilnosti voznog reda**

Tablica 24 prikazuje koliko je otpremljeno vlakova iz obrtnog kolodvora („Completed“), vrijeme čekanja na otpremu vlakova („Wait time“), vrijeme obrta garnitura („Cycle time“) i vrijeme provedeno u vožnji („Work time“). U svim segmentima je postignuta optimizacije na simuliranom modelu što povećava kvalitetu prijevozne usluge.

Usporedbom broja gradsko-prigradskih vlakova koji prometuju u vršnim satima opterećenja u studiji slučaja i u simulacijskom modelu, vidljivo je povećanje iskorištenja infrastrukturnih i

voznih sredstava uz postignutu stabilnost voznog reda, gdje je povećan broj vlakova uz stabilan vozni red.

*Tablica 24: Usporedba analiziranih podataka modela studije slučaja i simuliranog modela*

<b>MODEL</b>	<b>COMPLETED</b>	<b>WAIT TIME</b>	<b>CYCLE TIME</b>	<b>WORK TIME</b>
studija slučaja	26	55,35	80,88	80,88
simulacijski	35	0	26,19	25,07

U jutarnjim vršnim satima opterećenja, kada je potreba za kapacitetima najveća, u simuliranom modelu imamo više ostvarenih kompletnih vožnji te se time povećavaju potrebni kapaciteti bez negativnog utjecaja na stabilnost voznih redova ostalih vlakova koji prometuju u vremenskom intervalu jutarnjeg vršnog opterećenja.

U studiji slučaja devijacija u izvršenju voznog reda regionalnih vlakova utječe na stabilnost voznog reda ostalih vlakova. Simulacijski model s istom devijacijom voznog reda regionalnih vlakova i većim brojem gradsko-prigradskih vlakova dokazuje stabilnost voznog reda ostalih vlakova bez neplaniranih čekanja.

## 6 Zaključak

Nestabilnost voznog reda smanjuje kvalitetu prijevoza. Za povećanje kvalitete prijevoza potrebno je optimizirati tehnološke proračune u organizaciji prometa te odrediti postupke i pravila prilikom pojave nestabilnosti u voznom redu.

Kako se prilikom analize problema obuhvaća cjelokupna tehnologija postupaka s vlakovima, tako se i prilikom optimizacije i pronalaska prihvatljivih rješenja obuhvaća cjelokupni proračuna svih parametara u svojstvu tehnologije prometa.

Problem u realnom okruženju od kojeg se krenulo, analizirajući probleme i nedostatke zbog kojih dolazi do nestabilnosti voznog reda, velika je vjerojatnost kašnjenja vlakova višeg ranga. Takva kašnjenja utječu na stabilnost voznog reda vlakova u prigradskom prometu, a od ukupnih kašnjenja najveći dio se odnosi na čekanja vlakova nižeg ranga zbog pretjecanja vlakova višeg ranga i na čekanja garniture iz obrta.

Da bi se riješio problem na koji ukazuju izvršene analize, u realnom okruženju detektirani su segmenti u kojima se problem pojavljuje i koji su za njega vezani.

Općeniti problem analizirane postojeće organizacije pokazuje da na stabilnost voznog reda prigradskih vlakova vrlo veliki utjecaj imaju vlakovi koji ulaze u područje gradsko-prigradskog prometa u zakašnjenju. Da bi se negativni utjecaj smanjio, potrebno je izjednačiti rang vlakova kako bi prometovali po načelu FI-FO (first in – first out). U istraživanju se došlo do konkretnih rezultata koliki postotak kašnjenja otpada na čekanja na pretjecanje u obrtnim kolodvorima, a koliki postotak kašnjenja se odnosi na čekanja na garnituru u obrtnom kolodvoru. Ta kašnjenja iznose nešto manje od 70% svih kašnjenja vlakova gradsko-prigradskog prometa.

Funkcioniranje simulacijskog modela ovisno je o kvaliteti prijevoznih sredstava i kvaliteti infrastrukture. Usporedbom s postojećom podjelom gdje se vlakovi, koji prometuju u jednoj vrsti prometa koriste za upotpunjavanje kapaciteta u drugoj vrsti prometa, pokazuju da su negativni nego učinci na stabilnost voznog reda veći od pozitivnih. Primjer za navedenu tvrdnju je vidljiv na studiji slučaja.

Točno definirana podjela putničkog prometa prema simuliranom modelu temelji se na podjeli prema vremenima putovanja. Na taj način je moguće odvajanje vrsta prometa, bolje investicijsko planiranje uz praćenje tokova putnika, naročito u dnevnim migracijama te omogućava stvarnu raspodjelu prihoda i rashoda čime se olakšava definiranje pristupa ugovorima s državom o pružanju javne usluge. Geografski određeni kolodvori obrta

omogućavaju upravitelju infrastrukture da minimalnim ulaganjima u infrastrukturu održava postojeće stanje, a fokus kvalitete prijevozne usluge usmjeri na ponudu prijevoznika. U predloženom modelu stanje infrastrukture određuje kolodvore obrta. Ukoliko je infrastruktura kvalitetna i ima kvalitetno održavanje, odnosno ukoliko se poveća komercijalna brzina vlakova, lokacija obrtnih kolodvora se udaljava od aglomeracijskog centra. U slučaju smanjenja komercijalne brzine zbog stanja infrastrukture, udaljenost od aglomeracijskog centra do obrtnih kolodvora se smanjuje kao i kvaliteta prijevozne usluge.

Taktni promet punu svrhu ima kod dvokolosiječnih dionica. Vozni red u kojem je promet taktno organiziran pruža optimalnu iskorištenost kapaciteta pruge i vozni sredstava. Određeni intervali koeficijenta popunjenosti, koji se javljaju tijekom dana, predstavljaju osnovicu za određivanje potrebnih kapaciteta. Kraći takt u jedinici vremena znači veći kapacitet prijevoza. Ukoliko povećamo takt, smanjujemo kapacitete i broj potrebnih prijevoznih jedinica. Reguliranjem takta 10 – 30 minuta broj potrebnih prijevoznih jedinica, u ovom slučaju elektromotornih vlakova, kreće se u rasponu od 3 – 12 jedinica. Uvođenjem taktnog prometa na osnovi istraženog i predloženog izračuna minimalnog intervala slijeđenja povećava se propusnost pruge za 8%. Navedeno je matematički dokazano, što je vidljivo i kod povećanja broja vlakova gradsko-prigradskog prometa u vršnim satima opterećenja, čime se povećao i prijevozni kapacitet.

U nepredvidljivim situacijama, kao što je trenutna pandemijska situacija s virusom COVID 19, kada se odlukama vlasti moraju smanjiti prijevozni kapaciteti zbog sigurnosti korisnika, 40%-tno povećanje kapaciteta znači da je to, uz tako određeno ograničenje, 70% sadašnjih ponuđenih kapaciteta.

Pokazatelji za vrednovanje kvalitete razine usluge su podijeljeni u dvije grupe. Prva grupa su pokazatelji vezani za kvalitetu infrastrukture, a druga grupa pokazatelji vezani uz kvalitetu prijevoznih sredstava. U infrastrukturne pokazatelje kvalitete usluge spadaju: maksimalne brzine na pruzi, kvalitetno definirana mjesta stajališta, taktni vozni red i organizacija prometa. U kvalitetu prijevoznih sredstava spadaju: tipske garniture, predložena točna podjela putničkog prometa i komercijalna brzina vlakova.

Definiranjem matematičkog modela izračuna minimalnog intervala slijeđenja optimizira se tehnologija prometa što dovodi do povećanja kapaciteta prijevoza i iskorištenja prijevoznih sredstava. Uz navedeno simulirani matematički model izrađen u Petrijevim mrežama moguće je implementirati u buduća rješenja središnjeg upravljanja prometom.



Usporedbom modela studije slučaja i simulacijskog modela u ovom radu dokazano je da su postignuta unapređenja u optimizaciji organizacije prometa, prijevoznih kapaciteta i kapaciteta pruga te povećanju kvalitete prijevozne usluge željeznice kao nositelja masovnog javnog prijevoza.

## 7 Literatura

- [1] S. Steiner, M. Drljača i I. Lešković, »Promet i urbani razvoj,« *Međunarodni znanstveni skup Zelenilo grada Zagreba: Zbornik radova*, pp. 245-260, 2013.
- [2] M. Čičak, *Modeliranje u željezničkom prometu*, Zagreb: Institut prometa i veza, 2005.
- [3] D. Feletar i A. Malić, »Gravitacijska zona dnevnih migracija kao čimbenik razvoja prigradskog prometa Zagreba,« *Znanstveni skup Prometna problematika grada Zagreba, Zbornik*, pp. 495-505, 2006.
- [4] M. Mlinarević, K. Bačić, T. J. Mlinarić, M. Nikšić, D. Dedović, M. Bilić, I. Perić, B. Duvnjak, M. Jukić, D. Nikić, K. Đurašević, J. Hercigonja i F. Palić, *Studija razvoja i unapređenja kvalitete usluga gradsko-prigradskog željezničkog prijevoza putnika*, Zagreb: Convena -inženjerski biro, 2010.
- [5] T. J. Mlinarić, M. Nikšić, Z. Schauperl, B. Duvnjak i T. Pleša, *Studija opravdanosti investicije u nove prijevozne kapacitete - motorne vlakove*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [6] B. Abramović, »Prijevozna potražnja u funkciji planiranja prometnog sustava,« u *Javni prijevoz putnika u funkciji regionalnog razvoja*, Čakovec, 2010.
- [7] B. Maretić i B. Abramović, »Proceedings of the International Scientific Conference "Science and Traffic Development" (ZIRP 2019),« *Promet – Traffic & transportation*, 32, pp. 863-873, 2020.
- [8] M. D. Mayer i E. J. Miller, *Urban Transportation Planning*, Singapore: McGraw-Hill Book Co, 2001.
- [9] T. J. Mlinarić, H. Haramina, I. Raspudić i B. Duvnjak, »Uloga regionalnog prijevoza u razvoju putničkog prometa u Republici Hrvatskoj,« *KoREMA - Zbornik radova*, pp. 190-195, 2012.

- [10] M. Čičak, J. Kukec, P. Kovač, D. Vuletić, B. Prlina i B. Samardžić, Studija razvoja željezničkog čvora Zagreb, Zagreb: Istraživanje i projektiranje u prometu d.o.o., 2016.
- [11] B. Duvnjak, T. J. Mlinarić i H. Haramina, »Improvement of Passenger Service Quality by Application of the New Model of Railway System (on the Railway Line Zagreb Main Station – Dugo Selo),« *Proceedings of the International Scientific Conference “The Science and Development of Transport” (ZIRP 2020)*, pp. 47-55, 2020.
- [12] D. Kezić, N. Perić i I. Petrović, »An Algorithm for Deadlock Prevention Based on Iterative Siphon Control of Petri net /,« *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 47 , pp. 19-30, 2006.
- [13] X. Meng, L. Jia i W. Xiang, »A Petri net model od train operation simulation for harmonizing train timetables of neighbour dispatching sections,« *Promet – Traffic & Transportation*,, pp. 647-660, Vol. 30, 2018, No. 6,.
- [14] T. J. Mlinarić, T. Pleša i I. Balagić, »Implementation of Periodic Timetable in regional passenger transport of Republic of Croatia,« *Road and Rail Infrastructure II, Proceedings of the Conference CETRA*, pp. 875-880, 2012.
- [15] P. Jovanović, P. Kecman, N. Bojović i D. Mandić, »Optimal allocation of buffer times to increase train schedule,« *European Journal of Operational Research*, 12, pp. 44-54, 2016.
- [16] S. Ziegler, N. Weik i N. Nießen, »The influence of buffer time distributions in delay propagation modelling of railway networks,« *Journal of Rail Transport Planning & Management* 8, pp. 220-232, 2018.
- [17] Zieger, Stephan, N. Weik i N. Nießen, »The impact of buffer time distributions on the nominal capacity of railway lines,« *Computers in Railways XVI*, pp. 308-318, 2019.
- [18] A. Schobel i M. Volcic, »Microscopic simulation of railway operations for developing integrated timetables,« *Road and Rail Infrastructure III*, pp. 685-690, 2014.
- [19] S. Walter, »Regional railways: Timetable-based long-term infrastructure development,« *Road and Rail Infrastructure III*, pp. 697-704, 2014.

- [20] L. Novačko, S. Mandžuka i M. Petrović, »Application of Microscopic Simulation of Traffic Flows in Developing Evacuation Plans for Inhabitants,« *Journal of civil engineering and architecture*, 8 , pp. 920-927, 20143.
- [21] »SIL4 Systems,« [Mrežno]. Available: <http://sil4systems.com/>. [Pokušaj pristupa 07. Veljača 2017.].
- [22] A. Fay, »A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control,« *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, svez. 13, pp. 719-729, 2000.
- [23] M. Čičak, S. Vesković i S. Mladenović, Modeli za utvrđivanje kapaciteta željeznice, Beograd: ZELNID, Preduzeće za železničku izdavačko-novinsku delatnost d.o.o., 2002.
- [24] B. Duvnjak, T. J. Mlinarić i R. Humić, »Establishing the capacities in the Inner City – Suburban Rail Passenger Transport,« *Road and Rail Infrastructure IV, Proceedings of the Conference CETRA*, pp. 557-565, 2016.
- [25] M. Petrović, I. Ljubaj i T. J. Mlinarić, »INCREASING QUALITY OF SERVICE IN RAILWAY PASSENGER TRANSPORT - CASE STUDY,« *Proceedings of the International Scientific Conference "Science and Traffic Development" (ZIRP 2019)*, pp. 325-335, 2019.
- [26] S. Zieger, N. Weik i N. Nießen, »The influence of buffer time distributions in delay propagation modelling of railway networks,« *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 8, pp. 220-232, 2018.
- [27] B. Dragan, B. Blaž i J. Vinko, Organizacija željezničkog prometa, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2006.
- [28] M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M. A. Salido, P. Tormos i A. Lova, »An Assessment of Railway Capacity,« *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, pp. 774-806, 20 April 2008.
- [29] A. Assad, »Models for Rail Transportation,« *Transportation Research Part A: General*, pp. 205-220, 1980.

- [30] A. H. Kaas, *Strategic Capacity Analysis of Networks: Developing and Practical use of Capacity Model for Railway Networks*, ScanRail Consult, Technical University of Denmark, 2011.
- [31] D. Jovanovic i P. Harker, »Tactical Scheduling of Rail Operations: the SCAN I System,« *Transportation Science* 25, pp. 46-64, 1991.
- [32] H. Haramina, A. Schobel i J. Aksentijević, »OpenTrack – A Tool for Simulation of Railway Networks,« *Road and Rail Infrastructure IV, Proceedings of the Conference CETRA 2016*, pp. 39-44, 2016.
- [33] T. J. Mlinarić, *Osnove tehnologije željezničkog prometa*, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2009.
- [34] A. Fay i E. Schneider, »Knowledge-based decision support system for real-time train traffic control,« *Computer-Aided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 471*, pp. 347-370, 1999.
- [35] I. Švaljek, T. Kožulj i M. Bošnjak, *Tehničko-eksploatacijski pokazatelji i značajke vučnih vozila Hrvatskih željeznica*, Zagreb: HŽ-Hrvatske željeznice d.o.o., 2003.
- [36] V. Borza i J. Foldiak, »Integrated periodic timetable based concepts in Hungarian national transport strategy,« *CETRA, 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure*, pp. 705-711, 28.-30. April 2014.
- [37] D. C. Gazis, *Traffic theory*, Kluwer Academic Publishers Group, 2002, pp. 13-15.
- [38] M. Čičak, *Organizacija železničkog saobraćaja II*, Beograd: Saobraćajni fakultet Beograd, 2005.
- [39] M. Petrović, T. J. Mlinarić i I. Šemanjski, »Location Planning Approach for Intermodal Terminals in Urban and Suburban Rail Transport,« *Promet – Traffic & Transportation*. 31, pp. 101-111, 2019.
- [40] HŽI, *Uputa HŽI-70*, Zagreb: HŽI, 2014.

- [41] H. I. d.o.o., »HŽ Infrastruktura,« 26. veljače 2021. [Mrežno]. Available: [https://www.hzinfra.hr/wp-content/uploads/2021/01/2021\\_III\\_IOM.pdf](https://www.hzinfra.hr/wp-content/uploads/2021/01/2021_III_IOM.pdf). [Pokušaj pristupa 26. veljače 2021.].
- [42] J. Pahl, *Glossar Systemtechnik des Schienenverkehrs*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021.
- [43] D. Badanjak, B. Bogović i V. Jenić, *Organizacija željezničkog prometa*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2004.
- [44] I. A. Hansen i J. Pahl, *Railway timetabling & operations - analysis, modelling, optimisation, simulation, performance evaluation (2nd ed.)*, Hamburg: Eurailpress, 2014.
- [45] T. Murata, »Petri Nets: Properties, Analysis and Applications,« *Proceedings of the IEEE, Vol. 70*, pp. 541-580, 1989.
- [46] W. Brauer i W. Reisig, »Carl Adam Petri and "Petri Nets",« Januar 1996. [Mrežno]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/229125009\\_Carl\\_Adam\\_Petri\\_and\\_Petri\\_Nets](https://www.researchgate.net/publication/229125009_Carl_Adam_Petri_and_Petri_Nets). [Pokušaj pristupa 20. lipnja 2021.].
- [47] Č. M. Negotić, A. Gudelj i D. Kezić, »Upravljanje prometom autonomnih vozila na kontejnerskom terminalu primjenom obojene Petrijeve mreže,« *Zbornik radova tridesetčetvrtog skupa o prometnim sustavima s međunarodnim sudjelovanjem*, pp. 120-123, 2014.
- [48] A. Gudelj i D. Kezić, »Optimization of Waterway with Multiple Locks and Canals by Integration of Petri Net and Genetic Algorithm,« *Journal of Mathematics and System Science*, 3, pp. 577-591, 2013.
- [49] A. Gudelj, D. Kezić i S. Vidačić, »Planning and Optimization of AGV Jobs by Petri Net and Genetic Algorithm /,« *Journal of Information and Organizational Sciences*, 36, pp. 99-122, 2012.

- [50] D. Kezić, N. Perić i I. Petrović, »An Algorithm for Deadlock Prevention Based on Iterative Siphon Control of Petri net,« *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 47, pp. 19-30, 2006.
- [51] J. Matković, D. Kezić i R. Bošnjak, »Sinteza nadzornika pomorskog prometa,« *Automatizacija u prometu - KoREMA*, pp. 113-116, 2017.
- [52] R. Bošnjak, D. Kezić i P. Vidan, »Methodology of synthesis of the supervisors by using Petri net,« *Brodogradnja*, pp. 57-66, 2017.
- [53] D. Kezić, R. Antonić i N. Račić, »Automatic supervisory system synthesis for port cranes collision prevention by using Petri net /,« *Promet – Traffic & Transportation*, 18, pp. 143-150, 2006.
- [54] D. Kezić, I. Vujović i A. Gudelj, »Petri net Approach of Collision Prevention Supervisor design in Port transport system,« *Promet – Traffic & transportation*, 19 , pp. 269-275, 2007.

## 8 PRILOZI

### 8.1 POPIS SLIKA

Slika 1: Propusnost pruge Dugo Selo – Sesvete (Izvor:HŽ Infrastruktura).....	11
Slika 2: Dijagram brzina prigradskih i brzih vlakova .....	12
Slika 3: Grafički prikaz tokova putnika (Izvor HŽ PP) .....	13
Slika 4: Grafički prikaz plana poslovanja HŽPP (Izvor: HŽPP) .....	14
Slika 5: Udio u prevezenim putnicima po županijama (Izvor: HŽPP) .....	15
Slika 6: Ostvareni pkm razdoblje 2014. – 2020. (Izvor: HŽPP).....	15
Slika 7: Ostvareni pkm u unutarnjem prometu (Izvor: HŽPP) .....	16
Slika 8: Grafikon kretanja broja prevezenih putnika (Izvor: HŽPP) .....	17
Slika 9: Potrebni kapaciteti kroz relacijski slijed službenih mjesta .....	19
Slika 10: Svakodnevna analiza na osnovi koje se mogu zahtijevati izmjene i dopune voznog reda.....	20
Slika 11: Podjela gradsko-prigradskog područja u zone.....	21
Slika 12: Primjena vremenske koncepcije određivanja GPP-a u gravitacijskoj zoni Zagreba	23
Slika 13: Duljina predloženih duljina područja prometa .....	25
Slika 14: Podjela mreže na DP, RP i GPP promet (Izvor: [5] ) .....	25
Slika 15: Uzroci kašnjenja vlakova GPP-a .....	28
Slika 16: Utjecaj na stabilnost voznog reda vlakova u zakašnjenju.....	29
Slika 17: Odnos redovitosti i kašnjenja vlakova koji ulaze u područje prigradskog prometa .	30
Slika 18: Grafikon prometa vlakova (Izvor: HŽ Infrastruktura).....	34
Slika 19: Prikaz voznog reda vlaka 210 u knjižici voznog reda (Izvor: HŽ Infrastruktura)....	34
Slika 20: Izvadak iz voznog reda (Izvor: HŽ Infrastruktura).....	35
Slika 21: Primjer minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova bez ograničenja.....	41
Slika 22: Intervali minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova na prugama s dvosmjernim prometom .....	42



Slika 23: Propusnost pruge u razdoblju 2012. – 2019. godine (Izvor: HŽ Infrastruktura) .....	43
Slika 24: Primjer utjecaja vlakova višeg ranga na stabilnost voznog reda prigradskih vlakova .....	47
Slika 25: Prikaz akceleracijskog uskog grla [Izvor: autor] .....	50
Slika 26: Postotak prohodnosti pruge u odnosu na iskorištenost projektirane brzine.....	52
Slika 27: Analiza kašnjenja vlakova u području GPP-a u vrijeme jutarnjeg vršnog opterećenja (Izvor: HŽ Infrastruktura) .....	53
Slika 28: Analiza kašnjenja prigradskih vlakova prilikom odlaska iz obrtnog kolodvora.....	54
Slika 29: Analiza kašnjenja vlakova prilikom dolaska u Zagreb GK .....	54
Slika 30: Predikcija prijevoza putnika gradsko-prigradskog prometa u razdoblju 2020. – 2025. godine (Izvor: HŽ PP) .....	58
Slika 31: Prikaz udaljenosti blokovnih odsjeka .....	61
Slika 32: Prikaz intervala minimalnog uzastopnog slijeđenja vlakova u blokovnom razmaku.....	62
Slika 33: Grafički prikaz odnosa vremena putovanja i brzine .....	64
Slika 34: Grafički prikaz voznog reda 2020/21. [Izvor: HŽ Infrastruktura].....	64
Slika 35: Usporedba prosječnog i dinamički izračunatog rezervnog vremena .....	66
Slika 36: Predložen taktni vozni red s novim izračunom minimalnog intervala slijeđenja .....	66
Slika 37: Minimalni interval slijeđenja .....	68
Slika 38: Dinamička vrijednost za određivanje rezervnog vremena.....	69
Slika 39: Rezervno vrijeme prema vremenu vožnje prethodnog i uzastopnog vlaka .....	70
Slika 40: Osnovni grafički elementi Petrijeve mreže.....	74
Slika 41: Sekvenca i paralelizam .....	75
Slika 42: Grafički prikaz usklađenja [Izvor: [45]] .....	75
Slika 43: Konflikt i konfuzija [Izvor: [45]].....	76
Slika 44: Hijerarhijska mreža.....	78
Slika 45: Dodjeljivanje rola.....	79
Slika 46: XOR definiranje izbora aktivnosti .....	79

Slika 47: Vrijeme, trošak i vjerojatnost učešća rola.....	80
Slika 48: Studija slučaja prikazana Petrijevim mrežama .....	82
Slika 49: Pozicioniranje „kontrolora“ slobodnosti blokovnog odsjeka .....	83
Slika 50: Upotreba elementa XOR u izradi modela.....	83
Slika 51: Model otpreme vlakova iz obrtnog kolodvora u studiji slučaja.....	84
Slika 52: Područje otvorene pruge između dva kolodvora .....	85
Slika 53: Područje pruge između dva kolodvora .....	85
Slika 54: Područje kolodvora u koje nije moguće pretjecanje vlakova .....	85
Slika 55: Istraživani simulacijski model .....	86
Slika 56: Simulacijski model otpreme vlakova u obrtnom kolodvoru.....	86
Slika 57: Prikaz postupka izračuna rezervnog vremena prilikom otpreme uzastopnog vlaka.	87
Slika 58: Područje kolodvora s minimalnim infrastrukturnim zahvatima .....	88
Slika 59: Simulacijski model istraživane dionice .....	88

## 8.2 POPIS TABLICA

Tablica 1: Analiza iskorištenja osobnih vozila (Izvor: autor) .....	16
Tablica 2: Broj otpremljenih putnika po službenim mjestima za razdoblje 01.08. – 31.12.2015. godine: .....	18
Tablica 3: Odnos kvalitete infrastrukture i krajnjih udaljenosti zona GPP-a.....	22
Tablica 4: Razina usluge .....	27
Tablica 5: Vjerojatnost kašnjenja putničkih vlakova (izvor: HŽ Infrastruktura).....	27
Tablica 6: Analiza kašnjenja vlakova GPP-a za razdoblje 01.10.2020. – 31.12.2020. (Izvor: HŽ Infrastruktura).....	27
Tablica 7: Pojava vlakova prema vrsti u satnim intervalima .....	30
Tablica 8: Vremena vožnje između dionica s obzirom na broj stajališta.....	31
Tablica 9: Kvaliteta usluge predložene organizacije putničkog prometa („LoS“).....	32
Tablica 10: Izračun parametara za utvrđivanje potrebnog broja garnitura u taktnom prometu.....	44
Tablica 11: Potreban broj garnitura u taktnom prometu .....	44
Tablica 12: Dnevni intervali koeficijenta popunjenosti [Izvor: grafikon 1, vozni red 2018/19, HŽI] .....	45
Tablica 13: Razlike tumačenja dva toka prometa prilikom nastajanja akceleracijskog uskog grla .....	50
Tablica 14: Analiza kašnjenja vlakova koji ulaze u područje gradsko-prigradskog prometa..	53
Tablica 15: Analiza kašnjenja prigradskih vlakova .....	54
Tablica 16: Tablica prevezenih putnika (Izvor: HŽ PP) .....	57
Tablica 17: Matrica slučajeva slijeđenja vlakova .....	61
Tablica 18: Minimalni interval uzastopnog slijeđenja prema kategorijama vlakova.....	65
Tablica 19: Izračun dodatnog vremena izrazom 25 .....	70
Tablica 20: Vrste vlakova u modelu studije slučaja.....	88
Tablica 21: Analiza studije slučaja gradsko-prigradskog prometa Grada Zagreba [Yasper] ..	89
Tablica 22: Definirane role (klasifikacija vlakova) u simulacijskom modelu .....	90

Tablica 23: Analiza stabilnosti voznog reda simulacijskog modela [Analiza iz programa Jasper] .....	90
Tablica 24: Usporedba analiziranih podataka modela studije slučaja i simuliranog modela...	92

## ŽIVOTOPIS

Branimir Duvnjak rođen je u Zagrebu 8. listopada 1966. godine. Osnovnu i srednju školu je završio u Zagrebu.

Od 1985. do danas radi na Hrvatskim željeznicama, u kolodvorima zagrebačkog čvora i u Upravi HŽ Infrastrukture, gdje je od kolovoza 2014. do veljače 2016. godine bio izvršni direktor Organizacije i regulacije prometa.

Dana 19. veljače 2007. godine diplomirao je na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, Prometni odjel (tema diplomskog rada: „Analiza parametara za utvrđivanje kapaciteta tehničko-teretnog kolodvora Zagreb, mentor: prof. dr. sc. Tomislav Josip Mlinarić“).

Dana 2. ožujka 2009. godine diplomirao je na Fakultetu prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu, na zavodu za željeznički promet (tema diplomskog rada: Metodologija proračuna sastavljanja vlakova, mentor: prof. dr. sc. Tomislav Josip Mlinarić).

Od 2010. godine s prekidima radi kao vanjski suradnik na Fakultetu prometnih znanosti na kolegijima: Tehnologija željezničkog prometa I, Tehnologija željezničkog prometa II i Osnove tehnologije željezničkog prometa.

Od 17. prosinca 2011. godine član je Komore ovlaštenih inženjera tehnologije prometa i transporta kao ovlaštenu inženjer željezničkog prometa.

Sudjelovao je kao autor u izradi studija i projekata te je autor više znanstvenih članaka. Uz navedeno je sudjelovao na više međunarodnih i domaćih znanstvenih skupova.

## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA:

1. Duvnjak Branimir; Mlinarić, Tomislav Josip; Haramina, Hrvoje  
**Improvement of Passenger Service Quality by Application of the New Model of Railway System (on the Railway Line Zagreb Main Station – Dugo Selo).** // Proceedings of the International Scientific Conference “The Science and Development of Transport” (ZIRP 2020) / Edouard Ivanjko, Ph.D. Ratko Stanković, Ph.D. Luka Novačko, Ph.D. Marjana Petrović, Ph.D (ur.). Zagreb, 2020. str. 47-55 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
2. Duvnjak, Branimir; Mlinarić, Tomislav Josip; Humić, Renato  
**Establishing the capacities in the Inner City – Suburban Rail Passenger Transport.** // **Road and Rail Infrastructure IV**, Proceedings of the Conference CETRA 2016 / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Department of Transportation Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2016. str. 557-565 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
3. Mlinarić, Tomislav Josip; Haramina, Hrvoje; Raspudić, Ivica; Duvnjak, Branimir  
**Uloga regionalnog prijevoza u razvoju putničkog prometa u Republici Hrvatskoj.** // KoREMA - Zbornik radova Zagreb, 2012. str. 190-195 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), stručni)
4. Mlinarić, Tomislav Josip; Špilek, Nedjeljko; Duvnjak, Branimir  
**The methodology of evaluating the technical and technological parameters of the availability of inland infrastructure.** // mechanics transport communications, Part I, Issue 3 / Kolev, Petar (ur.). Sofija: Todor Kableshkov University of Transport, 2011. str. I-123 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
5. Mlinarić, Tomislav-Josip; Duvnjak, Branimir; Haramina, Hrvoje  
**Methodology of Train sorting on Zagreb - Rijeka railway line.** // DAAAM International Scientific Book 2011 / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2011. str. 243-256

## STUDIJE

1. Studija razvoja i unapređenja kvalitete usluga gradsko-prigradskog željezničkog prijevoza putnika Grada Zagreba i okolnih Županija – Zagreb 2010.
2. Studija razvoja i unapređenja kvalitete usluga gradsko-prigradskog željezničkog prijevoza putnika grada Varaždina i Varaždinske županije – Zagreb 2010.
3. Studija razvoja i unapređenja kvalitete usluga gradsko-prigradskog željezničkog prijevoza putnika grada Osijeka i Osječko-Baranjske županije – Zagreb 2010.
4. Studija razvoja i unapređenja kvalitete usluga gradsko-prigradskog željezničkog prijevoza putnika grada Rijeke i Primorsko-goranske županije – Zagreb 2010.
5. Studija razvoja i unapređenja kvalitete usluga gradsko-prigradskog željezničkog prijevoza putnika grada Splita i Splitsko-dalmatinske županije – Zagreb 2010.
6. Studija opravdanosti investicije u nove prijevozne kapacitete – motorne vlakove, Case Study: Srednjoročni plan (do 2020) – Zagreb 2012.