



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU



Pavle M. Pitka

# **OPTIMIZACIJA LINIJSKIH SISTEMA JAVNOG PREVOZA PUTNIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016. god



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>											
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>											
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска документација										
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал										
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација										
Аутор, <b>АУ:</b>	Павле Питка										
Ментор, <b>МН:</b>	Др Илија Танацков, редовни професор										
Наслов рада, <b>НР:</b>	Оптимизација линијских система јавног превоза путника										
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски										
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски										
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија										
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	Војводина										
Година, <b>ГО:</b>	2016										
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Факултет техничких наука										
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6										
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	8 поглавља/147 страна/82 цитата/14 табела/112 слика/-/-										
Научна област, <b>НО:</b>	Саобраћајно инжењерство										
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Организације и технологије транспорта										
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Јавни градски превоз путника, интервал слеђења возила, равномерност										
<b>УДК</b>											
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду										
Важна напомена, <b>ВН:</b>											
Извод, <b>ИЗ:</b>	<p>Анализом процеса кретања возила дуж линије идентификовани су параметри који утичу на ширење поремећаја интервала слеђења. На основу утврђених релација између параметара, формиран је детерминистички модел. Моделом је представљено ширење и слагање више простих поремећаја интервала слеђења по стајалиштима дуж линије и по поласцима у реду возње на једној линији јавног градског превоза путника. У раду је извршена математичка анализа сложеног утицаја различитих параметара на ширење поремећаја интервала слеђења возила. Резултати анализе су показали да је у фази пројектовања система у великој мери могуће утицати на секундарне поремећаје интервала слеђења и превентивно деловати на повећање степена равномерности интервала слеђења на линији. У складу са закључцима анализе модела развијен је поступак оптимизације којим се са аспекта времена боравка путника у систему и достигнуте равномерности интервала слеђења, вреднује подела дијаметралне линије на две радијалне.</p>										
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	16.07.2015.										
Датум одбране, <b>ДО:</b>											
Чланови комисије, <b>КО:</b>	<table border="1"><tr><td>Председник:</td><td>Др Милан Симеуновић, доцент</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>Др Небојша Бојовић, редовни професор</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>Др Павле Гладовић, редовни професор</td></tr><tr><td>Члан:</td><td>Др Милица Миличић, доцент</td></tr><tr><td>Члан, ментор:</td><td>Др Илија Танацков, редовни професор</td></tr></table>	Председник:	Др Милан Симеуновић, доцент	Члан:	Др Небојша Бојовић, редовни професор	Члан:	Др Павле Гладовић, редовни професор	Члан:	Др Милица Миличић, доцент	Члан, ментор:	Др Илија Танацков, редовни професор
Председник:	Др Милан Симеуновић, доцент										
Члан:	Др Небојша Бојовић, редовни професор										
Члан:	Др Павле Гладовић, редовни професор										
Члан:	Др Милица Миличић, доцент										
Члан, ментор:	Др Илија Танацков, редовни професор										
	Потпис ментора										



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Printed textual material
Contents code, <b>CC</b> :	Ph. D. thesis
Author, <b>AU</b> :	Pavle Pitka
Mentor, <b>MN</b> :	Ph.D. Ilija Tanackov, Professor
Title, <b>TI</b> :	Optimization of public transportation system
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	English
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2016
Publisher, <b>PB</b> :	Faculty of Tehnical Sciences
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8 chapters/147 pages/82 ref./14 tables/112 pictures/-/-
Scientific field, <b>SF</b> :	Traffic engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Organizations and technologies of transport
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Urban transport, Headway, Headway uniformity
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	<p>An analysis of the process of vehicle movement along the line was used to identify the parameters which influence irregular headway propagation. The established relations between the parameters were used to form a deterministic model. The model describes the propagation and concurrence of numerous primary headway irregularities by the stops along the line and by the scheduled departure times at one urban public transport system line. The paper presents a mathematical analysis of the complex effect of various parameters on the irregular headway propagation. The results of the analysis have shown that the secondary headway irregularities could be largely affected during the transport system design phase, thus preventing the increase in the degree of headway uniformity along the line. In accordance with the conclusions of the model analysis, an optimisation method has been developed, which is used to evaluate the division of the diametrical line into two radial lines from the aspect of on-line travel time and the achieved headway uniformity.</p>
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	16.07.2015.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Ph. D. Milan Simeunović
Member:	Ph. D. Nebojša Bojović
Member:	Ph. D. Pavle Gladović
Member:	Ph. D. Milica Miličić
Member, Mentor:	Ph. D. Ilija Tanackov
	Mentor's sign

# SADRŽAJ RADA

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	POSTAVKA I OPIS PROBLEMA .....	1
1.2	CILJ ISTRAŽIVANJA I OSNOVNE HIPOTEZE .....	2
1.3	PRIMENJENE METODE.....	3
1.4	STRUKTURA DISERTACIJE .....	4
<b>2</b>	<b>PREGLED LITERATURE .....</b>	<b>6</b>
2.1	MODELIRANJE RAVNOMERNOSTI INTERVALA SLEĐENJA VOZILA.....	7
2.1.1	<i>Deterministički pristup .....</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>Stohastički pristup .....</i>	<i>11</i>
2.2	OPTIMIZACIJA I UPRAVLJANJE RAVNOMERNOŠĆU INTERVALA SLEĐENJA .	12
2.2.1	<i>Mere i strategije na planskom nivou .....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Strategije na operativnom nivou .....</i>	<i>19</i>
<b>3</b>	<b>POUZDANOST USLUGE I POREMEĆAJ INTERVALA SLEĐENJA VOZILA .....</b>	<b>24</b>
3.1	OSNOVNI ELEMENTI RADA LINIJE .....	24
3.1.1	<i>Vreme obrta .....</i>	<i>25</i>
3.1.2	<i>Interval sleđenja vozila na liniji .....</i>	<i>26</i>
3.2	POREMEĆAJI U REDU VOŽNJE .....	27
3.3	KLASIFIKACIJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA .....	27
3.4	FAKTORI NASTANKA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA.....	28
3.4.1	<i>Tačnost polazaka sa terminusa .....</i>	<i>28</i>
3.4.2	<i>Varijacije vremena vožnje između stajališta .....</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Varijacije vremena zadržavanja vozila na stajalištu .....</i>	<i>29</i>
3.5	UTICAJ POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA NA PUTNIKA.....	30
3.5.1	<i>Vreme putovanja putnika.....</i>	<i>31</i>
3.5.2	<i>Neizvesnost vremena putovanja putnika .....</i>	<i>33</i>
3.5.3	<i>Komfor putnika u vozilu .....</i>	<i>33</i>
3.6	PARAMETRI ZA MERENJE POUZDANOSTI USLUGE.....	35
3.6.1	<i>Parametri za merenje tačnosti.....</i>	<i>35</i>
3.6.2	<i>Parametri za merenje ravnornosti.....</i>	<i>36</i>

3.7	STRATEGIJE I MERE ZA POVEĆANJE RAVNOMERNOSTI INTERVALA SLEĐENJA.....	38
3.7.1	<i>Opšte metode upravljanja sistemima.....</i>	38
3.7.2	<i>Upravljanje poremećajima u sistemu JGPP-a.....</i>	40
3.7.3	<i>Klasifikacija mera i strategija za povećanje ravnornosti.....</i>	43
<b>4</b>	<b>RAZVOJ MODELA ŠIRENJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA U SISTEMU JGPP-A.....</b>	<b>46</b>
4.1	IDENTIFIKACIJA UTICAJNIH PARAMETARA.....	46
4.1.1	<i>Vreme zadržavanja vozila na stajalištu.....</i>	47
4.1.2	<i>Vreme kretanja vozila između stajališta.....</i>	51
4.1.3	<i>Vreme zadržavanja vozila na terminusu.....</i>	51
4.2	MODEL ŠIRENJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA.....	52
4.2.1	<i>Širenje poremećaja po stajalištima duž linije.....</i>	53
4.2.2	<i>Širenje poremećaja po polascima u redu vožnje i po stajalištima duž linije.....</i>	54
4.2.3	<i>Složeno delovanje većeg broja poremećaja intervala sleđenja u sistemu.....</i>	56
4.3	ANALIZA UTICAJA PARAMETARA NA ŠIRENJE POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA.....	62
4.4	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	67
<b>5</b>	<b>OPTIMIZACIJA STATIČKIH ELEMENATA LINIJE U CILJU POVEĆANJA OTPORNOSTI SISTEMA NA POREMEĆAJ.....</b>	<b>69</b>
5.1	CILJEVI OPTIMIZACIJE.....	70
5.2	DODATNO VREME BORAVKA PUTNIKA U SISTEMU.....	73
5.2.1	<i>Struktura vremena boravka putnika u sistemu JGPP-a.....</i>	73
5.2.2	<i>Model za proračun dodatnog vremena boravka jednog putnika u sistemu.....</i>	75
5.3	FAZE POSTUPKA OPTIMIZACIJE.....	78
5.3.1	<i>Prva faza - Podela dijametralne linije.....</i>	81
5.3.2	<i>Druga faza - Simulacija širenja poremećaja intervala sleđenja.....</i>	82
5.3.3	<i>Treća faza - Evaluacija ravnornosti intervala sleđenja.....</i>	82
5.3.4	<i>Četvrta faza - Evaluacija vremena boravka putnika u sistemu.....</i>	82
<b>6</b>	<b>ISTRAŽIVANJE KARAKTERISTIKA SISTEMA JAVNOG GRADSKOG PREVOZA PUTNIKA.....</b>	<b>86</b>
6.1	PODRUČJE ISTRAŽIVANJA.....	87
6.2	PROJEKTOVANI ELEMENTI LINIJA.....	88
6.2.1	<i>Statički elementi linija.....</i>	89

6.2.2	<i>Dinamički elementi linija</i> .....	91
6.3	ISTRAŽIVANJE TRANSPORTNIH ZAHTEVA I REALIZOVANIH DINAMIČKIH ELEMENATA .....	92
6.3.1	<i>Metodologija istraživanja</i> .....	92
6.3.2	<i>Karakteristike transportnih zahteva</i> .....	94
6.3.3	<i>Karakteristike realizovanih dinamičkih elemenata</i> .....	101
6.4	ISTRAŽIVANJE INTENZITETA ULAZAKA PUTNIKA U VOZILO .....	108
<b>7</b>	<b>PRAKTIČNA PRIMENA MODELA</b> .....	<b>111</b>
7.1	PODELA DIJAMETRALNE LINIJE ( <i>I faza</i> ).....	111
7.2	SIMULACIJA ŠIRENJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA ( <i>II faza</i> ).....	114
7.3	EVALUACIJA RAVNOMERNOSTI INTERVALA SLEĐENJA ( <i>III faza</i> ).....	120
7.4	EVALUACIJA VREMENA BORAVKA PUTNIKA U SISTEMU ( <i>IV faza</i> ).....	126
7.4.1	<i>Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu</i> .....	126
7.4.2	<i>Srednje vreme presedanja</i> .....	131
7.4.3	<i>Vreme boravka putnika u sistemu</i> .....	131
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>135</b>
8.1	PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA .....	140
	<b>LITERATURA</b> .....	<b>142</b>

# SPISAK SLIKA

Slika 1.1 Struktura disertacije .....	4
Slika 3.1 Dijagram put–vreme prilikom kretanja vozila na liniji (Banković, 1994) .....	25
Slika 3.2 Klasifikacija poremećaja intervala sleđenja vozila.....	28
Slika 3.3 Parametari od interesa za putnika u uslovima niske pouzdanosti usluge .....	31
Slika 3.4 Srednje vreme čekanja putnika u funkciji intervala sleđenja vozila (Vučić, 2005) .....	32
Slika 3.5 Prikaz iskorišćenja mesta u vozilu na najopterećenijoj deonici linije za slučaj ravnomernog intervala sleđenja i za slučaj grupisanja vozila .....	34
Slika 3.6 Šematski prikaz sistema u formi ulaz-izlaz.....	39
Slika 3.7 Upravljanje sa kompenzatorom (buffer) .....	39
Slika 3.8 Upravljanje sa povratnom spregom(feedback).....	39
Slika 3.9 Upravljanje u otvorenoj sprezi (feedforward).....	40
Slika 3.10 Šematski prikaz unutrašnje strukture sistema JGPP-a .....	41
Slika 3.11 Pouzdanost usluge – odstupanje realizovanog od projektovanog stanja sistema .....	41
Slika 3.12 Šematski prikaz primene pojedinih metoda upravljanja poremećajem intervala sleđenja ....	42
Slika 3.13 Klasiifikacija strategija i mera za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila .....	44
Slika 4.1 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intervala sleđenja vozila za različite režime ulaska putnika u vozilo i sistema naplate .....	48
Slika 4.2 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intervala sleđenja vozila za različite intenzitete nakupljanja putnika .....	49
Slika 4.3 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intenziteta nakupljanja putnika za različite režime ulaska putnika u vozilo i sistema naplate .....	50
Slika 4.4 <i>Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intenziteta ulaska putnika u vozilo za različite intervale sleđenja vozila</i> .....	50
Slika 4.5 Prostor – vreme dijagram širenja poremećaja intervala sleđenja vozila 1 .....	53
Slika 4.6 Prostor – vreme dijagram širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na naredni polazak. ....	55
Slika 4.7 Prostor – vreme dijagram kumuliranja i prenošenja poremećaja intervala sleđenja vozila....	60
Slika 4.8 Širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite polaske ( $h_p=1$ min, $\beta=0,2$ ) .....	63
Slika 4.9 Širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite vrednosti parametra $\beta$ ( $h_p=1$ min, $k=1$ ) .....	64
Slika 4.10 Širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite vrednosti parametra $\beta$ za vozilo 1 i 3 ( $h_i=1$ min) .....	64
Slika 4.11 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar s za različite vrednosti parametra $\beta$ za vozilo 1 i 3 ( $h_i=1$ min) .....	65
Slika 4.12 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar s za različite vrednosti parametra $\beta$ za vozilo 2 i 4 ( $h_p=1$ min).....	65
Slika 4.13 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar $\beta$ za različite vrednosti parametra s za vozilo 1 i 3 ( $h_p=1$ min).....	66
Slika 4.14 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar $\beta$ za različite vrednosti parametra s za vozilo 2 i 4 ( $h_p=1$ min).....	66
Slika 4.15 Grafički prikaz krivi za priraštaj funkcije od 45 stepeni.....	67
Slika 5.1 Upravljanje poremećajem intervala sleđenja u fazi projektovanja sistema .....	69
Slika 5.2 Uticaj podele dijametralne linije na ravnomernost intervala sleđenja vozila .....	71
Slika 5.3 Vreme boravka putnika u sistemu JGPP.....	73
Slika 5.4 Karakteristična područja linije od značaja za vreme boravka putnika u sistemu .....	76
Slika 5.5 Grafički prikaz kretanja putnika duž linije JGPP-a.....	76

Slika 5.6 Prikaz postupka optimizacije po fazama .....	80
Slika 5.7 Prikaz ulaznih i izlaznih parametara u postupku optimizacije .....	81
Slika 6.1 Prilaz mreže gradskih linija u Novom Sadu .....	87
Slika 6.2 Prikaz trase linije broj 3 Petrovaradin–Centar–Detelinara.....	89
Slika 6.3 Prikaz trase linije broj 5 Temerinski put–Centar–Avijatičarsko .....	90
Slika 6.4 Izgled brojačkog obrasca.....	93
Slika 6.5 Broj vožnji putnika na gradskim linijama – ceo dan –.....	94
Slika 6.6 Časovna raspodela broja vožnji putnika po časovima u toku dana–gradske linije .....	95
Slika 6.7 Časovna raspodela broja vožnji putnika u toku dana po smerovima na liniji broj 3 .....	96
Slika 6.8 Protok putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 3 .....	96
Slika 6.9 Protok putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 3 .....	97
Slika 6.10 Ulasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 3.....	97
Slika 6.11 Ulasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 3.....	97
Slika 6.12 Izlasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 3.....	98
Slika 6.13 Izlasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 3.....	98
Slika 6.14 Časovna raspodela broja vožnji putnika u toku dana po smerovima na liniji 5.....	99
Slika 6.15 Protok putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 5 .....	99
Slika 6.16 Protok putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 5 .....	100
Slika 6.17 Ulasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 5.....	100
Slika 6.18 Ulasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 5.....	100
Slika 6.19 Izlasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 5.....	101
Slika 6.20 Izlasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 5.....	101
Slika 6.21 Box plot vremena poluobrtu po periodima u toku dana – linija broj 3 .....	102
Slika 6.22 Box plot vremena poluobrtu po periodima u toku dana – linija broj 5 .....	102
Slika 6.23 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 3, 9:00-12:00.....	103
Slika 6.24 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 3, 12:00-16:00.....	103
Slika 6.25 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 5, 9:00-12:00.....	103
Slika 6.26 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 5, 12:00-16:00.....	104
Slika 6.27 Prikaz varijacije intervala po stajalištima duž linije 3, 9:00-12:00.....	104
Slika 6.28 Prikaz varijacije intervala sleđenja po stajalištima duž linije 3, 12:00-16:00 .....	104
Slika 6.29 Prikaz varijacije intervala po stajalištima duž linije 5, 9:00-12:00.....	105
Slika 6.30 Prikaz varijacije intervala sleđenja po stajalištima duž linije 5, 12:00-16:00 .....	105
Slika 6.31 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 3, 9:00-12:00 .....	105
Slika 6.32 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 3, 12:00-16:00 .....	106
Slika 6.33 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 5, 9:00-12:00 .....	106
Slika 6.34 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 5, 12:00-16:00 .....	106
Slika 6.35 Prikaz parametra PRDM po stajalištima duž linije 3.....	107
Slika 6.36 Prikaz parametra PRDM po stajalištima duž linije – linija broj 5 .....	107
Slika 6.37 Intenzitet ulazaka putnika u vozilo – Bul.Oslobođenja - Lutrija Vojvodine .....	108
Slika 6.38 Intenzitet ulazaka putnika u vozilo – Bulevar Mihajla Pupina – RK “Bazar“.....	109
Slika 6.39 Srednja vrednost intenziteta ulazaka putnika u vozilo – smer A .....	109
Slika 6.40 Srednja vrednost intenziteta ulazaka putnika u vozilo – smer B .....	110
Slika 6.41 Obrazac za merenje vremena zadržavanja vozila na stajalištu .....	110
Slika 7.1 Prikaz trasa novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 3 .....	112
Slika 7.2 Prikaz trasa novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 5 .....	113
Slika 7.3 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smer A, period 9:00–10:00.....	116
Slika 7.4 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smer A, period 13:00–14:00.....	117



Slika 7.5 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smer A, period 9:00–10:00.....	117
Slika 7.6 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smer B, period 13:00–14:00.....	118
Slika 7.7 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smer A, period 9:00–10:00.....	118
Slika 7.8 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smer B, period 13:00–14:00.....	119
Slika 7.9 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smer A, period 9:00–10:00.....	119
Slika 7.10 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smer B, period 13:00–14:00 .....	120
Slika 7.11 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer A, 13-14h .....	122
Slika 7.12 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer B, 9-10h .....	122
Slika 7.13 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer A, 13-14h .....	123
Slika 7.14 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer B, 9-10h .....	123
Slika 7.15 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer A, 13-14h .....	124
Slika 7.16 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer B, 9-10h .....	124
Slika 7.17 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer A, 13-14h .....	125
Slika 7.18 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer B, 9-10h .....	125
Slika 7.19 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer A, 13-14h .....	127
Slika 7.20 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer B, 9-10h .....	127
Slika 7.21 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer A, 13-14h .....	128
Slika 7.22 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer B, 9-10h .....	128
Slika 7.23 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer A, 13-14h .....	129
Slika 7.24 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer B, 9-10h .....	129
Slika 7.25 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer A, 13-14h .....	130
Slika 7.26 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer B, 9-10h .....	130
Slika 7.27 Srednje vreme presedanja putnika nakon optimizacije .....	131
Slika 7.28 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer A, 13-14h .....	132
Slika 7.29 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer B, 9-10h .....	132
Slika 7.30 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer A, 13-14h .....	133
Slika 7.31 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer B, 9-10h .....	133
Slika 7.32 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer A, 13-14h .....	133
Slika 7.33 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer B, 9-10h .....	134
Slika 7.34 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer A, 13-14h .....	134
Slika 7.35 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer B, 9-10h .....	134

## SPISAK TABELA

Tabela 3.1 Nivou usluge JP u zavisnosti od stepena tačnosti usluge .....	36
Tabela 3.2 Nivou usluge JP u zavisnosti od stepena ravnomernosti intervala .....	38
Tabela 3.3 Mogućnost primene opštih metoda upravljanja u potprocesima JGPP-a.....	43
Tabela 4.1 Vrednosti intenziteta ulaska putnika u vozilo u zavisnosti od režima izmene i sistema naplate (Tirachini i Hensher, 2011; Tirachini, 2013).....	49
Tabela 6.1 Statički i dinamički elementi linija u sistemu JGPP-a u Novom Sadu .....	88
Tabela 6.2 Statički elementi linije broj 3.....	89
Tabela 6.3 Statički elementi linije broj 5.....	91
Tabela 6.4 Časovana raspodela broja vožnji putnika na gradskim linijama.....	95
Tabela 6.5 Prosečni projektovani intervali sleđenja po periodima u toku dana .....	102
Tabela 7.1 Statički elementi novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 3.....	112
Tabela 7.2 Statički elementi novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 5.....	114
Tabela 7.3 Ulazni podaci za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja.....	114
Tabela 7.4 Ulazni podaci za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja - linija 3.....	115
Tabela 7.5 Ulazni podaci za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja - linija 5.....	115

## SPISAK SKRAĆENICA

- JGPP – Javni gradski prevoz putnika
- IEC – *eng. International Electrotechnical Commission*
- SCI – *eng. Science Citation Index* – Naučni indeks citiranosti
- AVL – *eng. Automatic Vehicle Location* – Automatsko lociranje vozila
- APC – *eng. Automatic Passenger Counter* – Automatsko brojanje putnika
- BRT – *eng. Bus Rapid Transit* – Brzi autobuski podsistem
- JP – Javni prevoz
- D/G/c – Matematički red iz oblasti teorije verovatnoće
- SAD – Sjedinjene Američke Države
- GPS – *eng. Global Positioning System* – Globalni pozicioni sistem
- TCQSM – *eng. Transit Capacity and Quality of Service Manual*
- HCM – *eng. Highway Capacity Manual*
- STDEV – Standardna devijacija
- RMSD – *eng. Root mean square deviation* – Koren srednje kvadratne greške
- PRDM – *eng. Percentage regularity deviation mean* – Procenat pravilnosti devijacije
- ITS – *eng. Intelligent transport systems* – Inteligentni transportni sistemi
- WIFI – *eng. Wireless LAN* – Bežična mreža
- GPRS – *eng. General Packet Radio Service* – Prenos podataka mobilnom telefonijom druge generacije
- WCDMA – *eng. Wideband Code Division Multiple Access* – Prenos podataka mobilnom telefonijom treće generacije
- ZOBS – Zakon o bezbednosti saobraćaja na putevima

## Rezime

*Kvalitet usluge sistema linijskog javnog gradskog prevoza putnika između ostalog, zavisi i od stepena ravnomernosti intervala sleđenja vozila. Primarni poremećaj u intervalu sleđenja vozila nastaje delovanjem različitih faktora. Poremećaj u intervalu sleđenja vozila ima tendenciju da se širi duž linije i na naredne polaske u redu vožnje. Veći broj istraživača je do sada izučavao širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu JGPP-a uzimajući u obzir postojanje samo jednog primarnog poremećaja intervala sleđenja.*

*Analizom procesa kretanja vozila duž linije identifikovani su parametri koji utiču na širenje poremećaja intervala sleđenja. Na osnovu utvrđenih relacija između parametara, formiran je deterministički model. Modelom je predstavljeno širenje i slaganje više prostih poremećaja intervala sleđenja po stajalištima duž linije i po polascima u redu vožnje na jednoj liniji javnog gradskog prevoza putnika. Prema razvijenom modelu složeni uticaj više primarnih poremećaja intervala sleđenja na ravnomernost kretanja vozila definiše se isključivo kao kumulativno delovanje prostih elemenata. Uticaj svakog prostog elementa u složenoj strukturi ukupnog poremećaja zavisi od lokacije nastanka i intenziteta primarnog poremećaja.*

*Uz uvažavanje svih ograničenja modela, izvršena je matematička analiza složenog uticaja različitih parametara na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila. Rezultati analize su pokazali da je u fazi projektovanja sistema u velikoj meri moguće uticati na sekundarne poremećaje intervala sleđenja i preventivno delovati na povećanje stepena ravnomernosti intervala sleđenja na liniji. U skladu sa zaključcima analize modela, u doktorskoj disertaciji je razvijen postupak optimizacije statičkih elemenata linije u cilju povećanja otpornosti sistema na širenje poremećaja. Naime, razvijen je postupak optimizacije kojim se sa aspekta vremena boravka putnika u sistemu i dostignute ravnomernosti intervala sleđenja, vrednuje podela dijametralne linije na dve radialne. Da bi predložena optimizacija pozitivno uticala i na krajnji kvalitet usluge koji sistem treba da pruži putniku, postupak optimizacije morao je da ispuni tri cilja: povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila, praktičnu primenljivost postupka, i očuvanje postojećeg kvaliteta usluge.*

## Abstract

*The quality of service of a public transport system depends, among other things, on the degree of headway uniformity. The primary headway irregularity is a result of various factors. Irregular headway has a tendency to propagate along the line and other scheduled departures. So far, numerous studies have dealt with irregular headway propagation in the public passenger transport system taking into account the existence of a single primary headway irregularity.*

*An analysis of the process of vehicle movement along the line was used to identify the parameters which influence irregular headway propagation. The established relations between the parameters were used to form a deterministic model. The model describes the propagation and concurrence of numerous primary headway irregularities by the stops along the line and by the scheduled departure times at one urban public transport system line. According to the developed model, the complex influence of numerous primary headway irregularities on the vehicle movement uniformity is defined exclusively as a cumulative effect of simple elements. The effect of each simple element in the complex structure of overall irregularity depends on the location of its origin and the intensity of the primary irregularity.*

*The paper presents a mathematical analysis of the complex effect of various parameters on the irregular headway propagation. The results of the analysis have shown that the secondary headway irregularities could be largely affected during the transport system design phase, thus preventing the increase in the degree of headway uniformity along the line. In accordance with the conclusions of the model analysis, an optimisation method has been developed, which is used to evaluate the division of the diametrical line into two radial lines from the aspect of on-line travel time and the achieved headway uniformity. In order for the suggested optimisation to positively affect the final service quality that the system should provide to the passenger, the optimisation method had to reach three goals: increase in headway uniformity, practical applicability of the method, and preservation of the present service quality.*

# 1 UVOD

## 1.1 POSTAVKA I OPIS PROBLEMA

Funkcionisanje savremenih urbanih sredina se ne može zamisliti bez sistema javnog gradskog prevoza putnika (JGPP). Kada se uzmu u obzir kriterijumi kao što su prostorni, ekonomski i ekološki, JGPP u većim urbanim sredinama predstavlja vid transporta bez konkurencije. Međutim, uloga sistema javnog gradskog prevoza putnika u funkcionisanju urbanih sredina u velikoj meri zavisi od kvaliteta usluge koju nudi sistem.

U standardima IEC 50-191 (1/191-19-01) kvalitet usluge definiše se kao opšti efekat svojstva usluge koji određuje stepen zadovoljenja potreba korisnika usluge, pri čemu se naglašava da kvalitet usluge određuje kompleks svojstava kvaliteta. (Gladović, 2012)

Kako bi se postigao željeni kvalitet usluge, projektovanjem mreže linija i reda vožnje neophodno je da transportna ponuda pruži adekvatan odgovor na transportne zahteve koji se postavljaju pred sistem JGPP-a. Pravilno projektovani sistem jeste osnova, ali ne i garant kvaliteta usluge koja će biti ponuđena korisnicima. Razlika između projektovanog i realizovanog kvaliteta usluge može da bude značajna, a nastaje kao posledica uticaja različitih unutrašnjih i spoljašnjih faktora na funkcionisanje sistema JGPP-a.

Proizvodni proces javnog gradskog prevoza putnika sastoji se iz dva dela: operativnog nivoa tj. stvarnih operacija i planskog nivoa, koji se sastoji od projektovanja mreže linija, reda vožnje, tarifnog sistema, sistema naplate i dr. Planski nivo predstavlja ulaz za operativni nivo. Na operativnom nivou stvarni proizvod obezbeđuje korisnicima kretanje u prostoru za određeni vremenski period. U praksi često se realizacija kretanja vozila duž linije ne podudara sa planiranim, odnosno javljaju se odstupanja u realizaciji projektovanog reda vožnje. U zavisnosti od veličine odstupanja dolazi do nepouzdanosti usluge. U sistemima javnog gradskog prevoza putnika odstupanja realizovanog intervala sleđenja vozila od projektovanog predstavljaju glavni parametar nepouzdanosti usluge. Ovaj rad bavi se

odstupanjima u intervalu sleđenja vozila na liniji JGPP-a, kao i mogućnostima za razmatranje i poboljšanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila u fazi projektovanja sistema.

Interval sleđenja predstavlja jedan od najznačajnijih dinamičkih elemenata linije, kako sa gledišta organizacije prevoza, tako i sa gledišta kvaliteta prevoza značajnog za putnike. Tokom realizacije reda vožnje razlika koja nastane između projektovanog i realizovanog intervala sleđenja predstavlja poremećaj intervala sleđenja.

Na linijama gde su projektovani intervali sleđenja manji od 15 minuta (gradske linije) putnici dolaze na stajalište ne konsultujući red vožnje. Na tim linijama tačnost nije od presudnog značaja kako za korisnike tako i za održavanje ravnomernosti intervala sleđenja. Smanjen nivo ravnomernosti intervala sleđenja vozila negativno utiče na sledeća tri aspekta putovanja putnika: produžava prosečno vreme putovanja putnika, neizvesnost vremena putovanja putnika se povećava, komfor putnika u vozilu opada.

U idealnim uslovima sistem javnog gradskog prevoza putnika funkcioniše sa ravnomernim intervalom sleđenja vozila. Do nastanka poremećaja intervala sleđenja dolazi usled negativnog uticaja određenih faktora na pojedine vremenske komponente planiranog vremena obrta. Tada vozilo koje se kreće na liniji žuri ili kasni u odnosu na projektovani interval sleđenja vozila. U sistemima gde ne postoje mere za smirivanje poremećaja intervala sleđenja nastali poremećaj jednog vozila ima tendenciju da se širi duž linije i prenosi na naredne polaske u redu vožnje. Krajnji slučaj navedenog poremećaja intervala sleđenja je grupisanje vozila na liniji.

U okviru oblasti neravnomernosti intervala sleđenja, veći broj autora je do sada istraživao širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu JGPP-a uzimajući u obzir postojanje samo jednog primarnog poremećaja intervala sleđenja. Do sada nije bilo istraživanja koja bi posmatrala slučajeve kada na liniji JGPP-a nastane veći broj primarnih poremećaja intervala sleđenja vozila na različitim polascima jedne linije.

U skladu sa prethodno navedenim, bazni problem istraživanja u ovoj disertaciji je usmeren ka modeliranju kumulativnog uticaja poremećaja intervala sleđenja na kretanje vozila u posmatranom polasku. Istraživanje u disertaciji obuhvatilo je i rangiranje uticaja parametara na širenje poremećaja i optimizaciju statičkih elemenata linije, sa ciljem povećanja ravnomernosti sleđenja vozila na liniji kroz povećanje otpornosti sistema na širenje poremećaja.

## **1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA I OSNOVNE HIPOTEZE**

Dosadašnja istraživanja su problem ravnomernosti intervala sleđenja posmatrali samo za slučaj postojanja jednog primarnog poremećaja intervala sleđenja. Realan sistem javnog gradskog prevoza putnika bez obzira na primenjenu tehnologiju funkcioniše u uslovima konstantnog delovanja unutrašnjih i spoljašnjih faktora na nastanak poremećaja u intervalu sleđenja vozila. U realnom sistemu na ravnomernost intervala sleđenja vozila utiče veći broj primarnih poremećaja, koji su različiti po mestu i vremenu nastanka.

Jedan od glavnih ciljeva istraživanja je da se kroz analizu procesa koji se odvijaju na stajalištima utvrde bazični parametri i njihove međusobne veze koje utiču na kretanje vozila duž linije, i da se na osnovu promena pomenutih bazičnih parametara utvrde zakonitosti kumulativnog uticaja većeg broja poremećaja intervala sleđenja vozila različitih polazaka na kretanje vozila na željenom polasku. Pregledom i analizom najznačajnijih istraživanja iz oblasti poremećaja intervala sleđenja u sistemima JGPP-a, uočeno je da se mali broj autora bavio optimizacijom statičkih elemenata linije i stvaranjem otpornosti sistema na širenje poremećaja. Drugi cilj disertacije je definisanje postupka optimizacije statičkih elemenata linije na osnovu razvijenog modela širenja poremećaja intervala sleđenja vozila. Postupak optimizacije predstavlja pomoćni alat koji treba da obezbedi praktičnu primenu modela širenja poremećaja kroz povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila na liniji, ne narušavajući postojeći kvalitet usluge.

Ciljevi disertacije se ne zasnivaju na prikupljanju i obradi realnih podataka poremećaja intervala sleđenja, već se odnose na pregled i klasifikaciju postojećih modela širenja poremećaja intervala sleđenja vozila i metoda upravljanja poremećajem intervala sleđenja vozila u sistemu JGPP-a.

Na osnovu definisanog problema i ciljeva disertacije definisane su dve osnovne i dve pomoćne hipoteze.

**Osnovna hipoteza 1:** *Za slučaj postojanja većeg broja primarnih poremećaja intervala sleđenja vozila na različitim polascima u sistemu JGPP-a, moguće je definisati širenje poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu na osnovu veličine i pozicije primarnih poremećaja i bazičnih parametara koji određuju vreme zadržavanje vozila na stajalištu.*

**Pomoćna hipoteza 1:** *Vreme zadržavanja vozila na stajalištu je moguće definisati na osnovu sledećih parametara: intervala sleđenja, intenziteta nakupljanja putnika na stajalištu, intenziteta ulazaka putnika u vozilo.*

**Pomoćna hipoteza 2:** *Moguće je razviti deterministički model za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu JGPP-a, koji će omogućiti rangiranje uticaja parametara na stepen širenja poremećaja.*

**Osnovna hipoteza 2:** *Korišćenjem determinističkog modela u fazi projektovanja linije moguće je izvršiti optimizaciju statičkih elemenata linije sa ciljem povećanja otpornosti sistema na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila na liniji JGPP-a.*

### 1.3 PRIMENJENE METODE

Na osnovu definisanog problema, postavljenih ciljeva istraživanja i hipoteza, a za potrebe izrade disertacije, primenjene su metode i tehnike istraživanja zasnovane na poznatim pravilima i metodama naučnog saznanja. Svaka faza izrade doktorske disertacije uslovljavala je primenu različitih pojedinačnih, ali i kombinovanih naučno–istraživačkih metoda i tehnika.

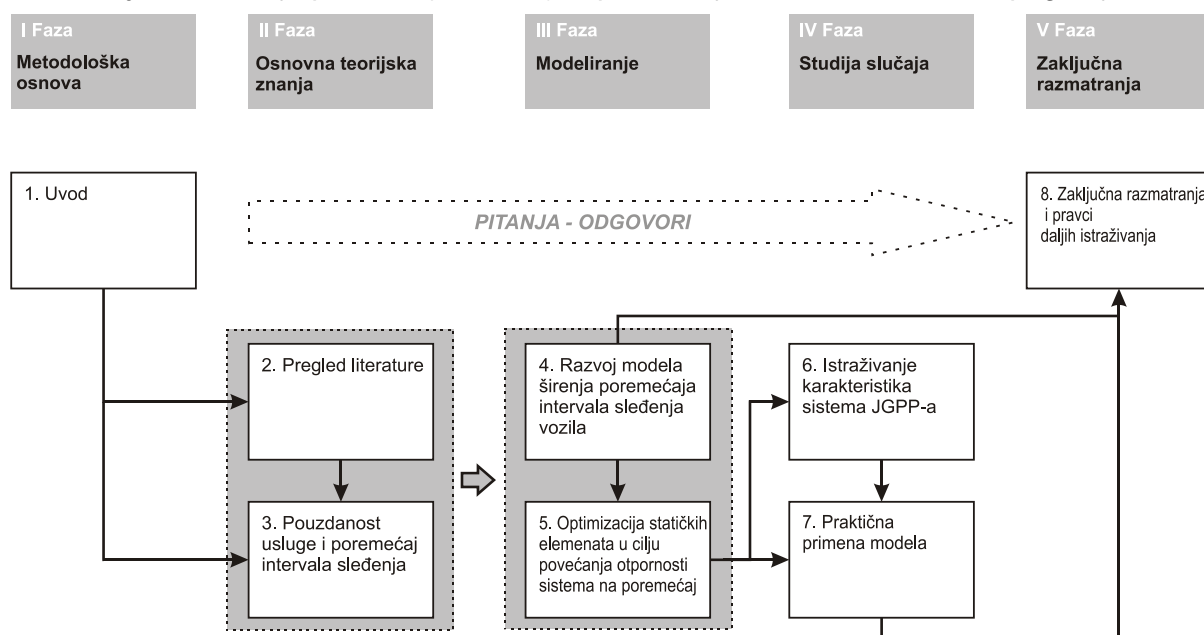


Primenjene naučno–istraživačke metode i tehnike:

- za prikupljanje i analizu dosadašnjih istraživanja i teoretskih saznanja korišćene su: metode prikupljanja podataka, metode formiranja baze podataka, metode klasifikacije i metode analize,
- za razvoj determinističkog modela, analize uticaja parametara i formiranja postupka optimizacije korišćene su: metode modelovanja, matematičke metode (algebra, teorija redova i matematička analiza), statističke metode,
- za istraživanje karakteristika sistema i praktičnu primenu modela korišćene su: metode prikupljanja podataka, metode formiranja baze podataka, metode analize i sinteze rezultata, metode klasifikacije, statistička obrada i metode komparacije,
- za izvođenje zaključaka i određivanje pravca daljih istraživanja korišćene su: metode analize, sinteze, indukcije i dokazivanja hipoteza.

## 1.4 STRUKTURA DISERTACIJE

U skladu sa postavljenim problemom, ciljevima i hipotezama disertacije, realizovana istraživanja obuhvataju pet faza (Slika 1.1), a predstvaljena su u okviru osam poglavlja.



Slika 1.1 Struktura disertacije

U okviru uvodnog poglavlja definisan je problem, ciljevi i hipoteze istraživanja. Zatim su navedene naučno-istraživačke metode, koje su korišćene za izradu disertacije.

U drugom poglavlju predstavljena su dosadašnja istraživanja iz oblasti ravnomernosti intervala sleđenja. Pregled literature je razdvojen u dve celine: (I) modelovanje

ravnomernosti intervala sleđenja i (II) strategije i mere za upravljanje ravnomernošću intervala sleđenja vozila.

U skladu sa predmetom disertacije u okviru trećeg poglavlja uopšteno su predstavljeni osnovni elementi rada linija, sa posebnim akcentom na interval sleđenja vozila i vreme obrta linije. Izvršeno je definisanje i klasifikacija poremećaja intervala sleđenja vozila. Takođe je detaljno opisan poremećaj intervala sleđenja preko faktora nastanka poremećaja, uticaja poremećaja na putnike i parametara za merenje poremećaja intervala sleđenja vozila. Na osnovu opštih metoda upravljanja u Kibernetici i unutrašnje strukture sistema JGPP-a izvršena je analiza mogućnosti primena određenih metoda za upravljanje poremećajem intervala sleđenja, kao i klasifikacija postojećih strategija i mera.

Razvoj modela širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na jednoj liniji JGPP-a izvršeno je u četvrtom poglavlju u okviru tri celine. U prvoj celini, kroz strukturalno sagledavanje vremena kretanja vozila duž linije, utvrđene su zakonitosti procesa koji utiču na širenje i prenošenje poremećaja intervala sleđenja. U drugoj celini razvijen je deterministički model širenja poremećaja intervala sleđenja vozila, a u trećoj celini je analizirana osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametre modela.

U petom poglavlju razvijen je postupak optimizacije ravnomernosti intervala sleđenja vozila u fazi projektovanja sistema koji kombinuje realno utvrđene karakteristike kretanja putnika na liniji i simulacije širenja poremećaja intervala sleđenja duž linije.

Za potrebe praktične primene postupka optimizacije, u šestom poglavlju predstavljena su istraživanja karakteristika sistema JGPP-a u Novom Sadu. Istraživanja su obuhvatila: utvrđivanje projektovanih statičkih i dinamičkih elemenata sistema, utvrđivanje karakteristika kretanja putnika duž linije i karakteristika realizovanih dinamičkih elemenata linija, i utvrđivanje intenziteta ulazaka putnika u vozilo.

U okviru poglavlja broj 7, studijom slučaja za gradske linije broj 3 i broj 5 u sistemu JGPP-a u Novom Sadu, izvršena je praktična primena postupka optimizacije na konkretnom problemu.

U osmom poglavlju, na osnovu sprovedenih istraživanja, dati su zaključci i pravci daljih istraživanja. Na kraju disertacije, dat je popis korišćene literature i prikazani su prilozi.

## 2 PREGLED LITERATURE

U skladu sa predmetom rada, postavljenim ciljevima i hipotezama u radu izvršen je pregled literature iz oblasti pouzdanosti usluge, sa posebnim akcentom na istraživanja koja se odnose na ravnomernost intervala sleđenja vozila. Najveći deo neophodne naučne literature je obezbeđen pretraživanjem časopisa, knjiga, indeksnih baza, doktorskih disertacija. Prilikom izbora literature, uzeti su u obzir najznačajniji i najcitiraniji izvori. Primarni izvori za pronalaženje naučnih informacija su bili časopisi sa SCI liste, doktorske disertacije, naučne monografije i udžbenici.

U okviru modelovanja ravnomernosti intervala sleđenja vozila, koja pripada široj oblasti - pouzdanosti usluge, razlikuju se dve osnovne grupe matematičkih modela: deterministički i stohastički. Svaka od navedene grupe modela ima svoje prednosti i nedostatke. U oblasti pouzdanosti usluge JGPP-a, deterministički modeli su uglavnom korišćeni kada se želi utvrditi uticaj pojedinih procesa i parametara na ravnomernost intervala sleđenja vozila (kašnjenje vozila, promena intervala sleđenja vozila duž linije, grupisanje vozila i dr), dok su stohastički modeli uglavnom korišćeni u okviru strategija za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja na operativnom nivou.

Sistem JGPP-a treba da obezbedi visok nivo usluga svojim korisnicima da bi se postigao i visoki stepen zadovoljstva korisnika. Visok nivo usluge ne zahteva samo da korisnici doživljavaju kratko vreme čekanja, kratko vreme putovanja i minimum standarda komfora, već i da se usluga JGPP-a ne menja značajno tokom vremena. Mere i strategije upravljanja poremećajem intervala sleđenja vozila izučavaju se poslednjih pedeset godina, kako bi se izbeglo grupisanje vozila na linijama visoke frekvencije. Postoji veći broj mera i strategija upravljanja poremećajem intervala sleđenja u sistemu JGPP-a koje su korišćene u dostupnoj literaturi za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja. Korišćenjem navedenih mera i strategija postižu se sledeće koristi: poboljšava se ravnomernost intervala sleđenja, smanjuje se ukupno vreme čekanja, smanjuje se ukupno vreme vožnje, povećava se komfor putnika i smanjuju se varijacije navedenih pokazatelja.

Izvršeni pregled literature ima za cilj formiranje originalnog modela za definisanje širenja poremećaja intervala sleđenja vozila u situaciji postojanja većeg broja primarnih poremećaja u sistemu JGPP-a, kao i razvoj postupka optimizacije statičkih elemenata linije u cilju povećanja otpornosti sistema na poremećaje intervala sleđenja vozila.

Pregled literature analiziran je u dve odvojene celine. U okviru prve celine prikazani su modeli koji opisuju stanje ravnomernosti intervala sleđenja u vremenu/prostoru, pri čemu je fokus prikaza modela usmeren na korišćenim parametrima u determinističkim modelima, pretpostavkama modela i procesima koje model opisuje. U drugoj celini izvršena je klasifikacija i analiza mera i strategija upravljanja poremećajem intervala sleđenja vozila, koje su primenjene u dostupnoj literaturi.

## **2.1 MODELIRANJE RAVNOMERNOSTI INTERVALA SLEĐENJA VOZILA**

### **2.1.1 *Deterministički pristup***

Welding je jedan od prvih istraživača koji je analizirao neravnomernosti intervala sleđenja vozila (Welding, 1957). Welding je izučavao rad autobusa i železnice u Londonu, uzroke i efekte neravnomernosti intervala sleđenja vozila i aspekte grupisanja vozila na liniji. Od tada pa do danas formiran je veći broj determinističkih modela koji opisuju poremećaje u intervalu sleđenja vozila, širenje poremećaja po stajalištima duž linije, kao i fenomen grupisanja vozila na liniji JGPP-a. Sa druge strane u okviru različitih mera i strategija za upravljanje poremećajima intervala sleđenja vozila pojednini autori (Eberlein i ostali, 1998; Delgado i ostali, 2009; Eberlein, Wilson, i Bernstein, 2001; Nagatani, 2001; Ceder, 2007; W. Chen i ostali, 2012) razvili su determinističke modele kako bi definisali kretanje vozila duž linije u uslovima poremećaja intervala sleđenja.

Jedan od prvih radova u kojima su istraživani procesi koji utiču na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu javnog prevoza objavili su Newell i Potts (Newell i Potts, 1964). U ovom radu autori su istraživali kretanje autobusa u slučaju kada jedan autobus zakasni na stajalište. Oni su istakli da se u slučaju nastanka poremećaja u intervalu sleđenja vozila javljaju dva osnovna efekta kod kretanja vozila. Prvi efekat je tendencija kašnjenja vozila i događa se vozilu koje je zakasnilo na stajalište. Drugi efekat je tendencija kretanja vozila ispred reda vožnje i javlja se kod vozila koje sledi vozilo sa tendencijom kašnjenja. Delovanje oba efekta može da rezultuje uparivanjem vozila. Uz pretpostavke uniformnog kretanja vozila između stajališta, jednakog intenziteta nakupljanja putnika na svim stajalištima, i jednakog intenziteta ulazaka putnika u vozilo na svim stajalištima, Newell i Potts su izradili deterministički model kojim je definisano kretanje vozila u sistemu u slučaju nastanka poremećaja intervala sleđenja vozila. Na osnovu matematičke analize autori su zaključili da odnos intenziteta nakupljanja putnika i intenziteta ulazaka putnika u vozilo ima veliki uticaj na tendenciju neravnomernog kretanja vozila u sistemu. Tendencija

neravnomernog kretanja može se smanjiti postizanjem niskih vrednosti odnosa navedena dva parametra.

U svom radu Vučić je istraživao širenje kašnjenja vozova na linijama javnog prevoza analizirajući više uzastopnih stajališta (Vučić, 1969). Autor je istakao da je širenje kašnjenja vozova na liniji posledica promene u vremenu potrebnom za ukrcavanje putnika i da se zanemarivanjem spoljašnjih uticaja ne smanjuje realističnost modela. Vučićev deterministički model definiše kašnjenje dolazaka vozova na stajalište na osnovu veličine prvog kašnjenja voza na stajalištu, intenziteta nakupljanja putnika i intenziteta ukrcavanja putnika. U modelu je zanemareno vreme potrebno za izlazak putnika zbog činjenice da je zadržavanje voza na stanici determinisano vremenom potrebnim za ulazak putnika, što su kasnijim radovima usvojili mnogi autori (Xuan, Argote, i Daganzo, 2011; Daganzo, 2009; S.-X. He 2015). Vučićev model zasnovan je na sledećim pretpostavkama: primarni interval sleđenja vozova ( $h$ ) je uniforman, intenzitet nakupljanja putnika po stajalištima ( $\lambda$ ) je uniforman, intenzitet ukrcavanja putnika ( $\mu$ ) je uniforman, u voz se ukrcavaju svi nakupljeni putnici do trenutka kretanja voza sa stanice, i vreme kretanja voza između stajališta je konstantno. Vučić je bio jedan od prvih istraživača koji je u svom modelu uzeo u obzir i nakupljanje putnika za vreme zadržavanja vozila na stanici. Autor je zaključio da kašnjenje u velikoj meri zavisi od parametra  $\beta$ , kojim je definisan odnos intenziteta nakupljanja putnika na stajalištu ( $\lambda$ ) i razlika intenziteta ukrcavanja i intenziteta nakupljanja putnika ( $\mu - \lambda$ ). Prema Vučiću, parametar  $\beta$  može se definisati i kao odnos vremena stajanja voza na stanici ( $t_s$ ) i vremena koje protekne od polaska jednog voza do dolaska narednog voza ( $h - t_s$ ). U kasnijim radovima (Xuan, Argote, i Daganzo, 2011; Daganzo, 2009; S.-X. He 2015), uz određene izmene, autori su koristili ovaj parametar kako bi opisali uticaj zadržavanja vozila na stajalištu na širenje poremećaja u sistemu.

Turnquist i Bowman za razliku od prethodnih istraživanja (Newell i Potts, 1964; Vučić, 1969), su u svom radu (Turnquist i Bowman, 1980) istikli značajan uticaj varijacija u vremenu kretanja vozila između stajališta na grupisanje vozila (detaljnije opisano u okviru Strategija na planskom nivou).

Autori Chapman i Michel su u radu (Chapman i Michel, 1978) predstavili jednostavan deterministički model ponašanja autobusa na linijama sa velikom frekvencijom vozila javnog prevoza, za slučaj kada jedan autobus stigne na stajalište kasnije u odnosu vreme definisano redom vožnje. Model korišćen u ovom radu je sličan modelima drugih autora (Newell i Potts 1964; Vučić, 1969) ali ima drugačiju funkciju cilja. Newell i Potts su izveli izraz za vreme kad autobus napušta određeno stajalište. Vučićev model utvrđuje odstupanje dolaska vozila na stajalište, a definiše se kao razlika stvarnog polaska sa stajališta i vremena definisanog redom vožnje. Model autora Chapman i Michel opisuje grupisanje vozila. Autori u radu (Chapman i Michel, 1978) koriste vreme koje protekne od trenutka polaska autobusa sa stajališta do trenutka prispeća sledećeg autobusa na to stajalište, a zatim to koristi da bi se utvrdio broj stajališta na kome dolazi do grupisanja vozila. Model je definisan sledećim parametrima: projektovani interval sleđenja ( $h$ ), inicijalni poremećaj intervala sleđenja ( $h_d$ ), vreme potrebno za otvaranje i zatvaranje vrata i parametar ( $k$ ), koji predstavlja odnos između intenziteta pristizanja putnika i intenziteta ukrcavanja putnika u vozilo. U radu je ispitivan

uticaj pojedinih parametara na nastanak grupisanja vozila. Utvrđeno je da se povećanjem parametra  $k$  (odnos intenziteta pristizanja putnika i intenziteta ukrcavanja putnika) smanjuje rastojanje između stajališta sa inicijalnim poremećajem i mesta grupisanja vozila. Isti efekat se postiže povećanjem primarnog kašnjenja vozila na stajalište.

Analitičkim, determinističkim modelom Nagatani je u svom radu opisao kretanje autobusa u slučaju poremećaja intervala sleđenja na jednoj liniji javnog prevoza. Uparivanje vozila, usled pojave inicijalnog poremećaja, autor je definisao na osnovu zavisnosti između brzine kretanja autobusa i intenziteta nakupljanja putnika. Osnovna pretpostavka u modelu je da prosečna brzina putovanja vozila zavisi samo od intervala sleđenja, odnosno broja nakupljenih putnika na stajalištu. Autor kao rešenje problema uparivanja vozila predlaže meru preskakanja stajališta, kada poremećaj intervala sleđenja dostigne kritičnu vrednost (Nagatani, 2001).

U radu (Eberlein, Wilson, i Bernstein, 2001) je analitički rešavan problem zadržavanja vozila kao strategija optimizacije ravnomernosti intervala sleđenja vozila. Eberlein i ostali autori su za cilj optimizacije usvojili minimalno vreme čekanja putnika na stajalištu, a kao metoda optimizacije koristilo se kvadratno programiranje. Varijacije u intervalu sleđenja su opisane determinističkim modelom po stajalištima duž linije. Kao izvori poremećaja su posmatrane varijacije u vremenu zadržavanja vozila na stajalištu i varijacije u vremenu polazaka vozila sa terminusa. U cilju pojednostavljivanja modela, autori su vreme kretanja vozila između stajališta posmatrali kao konstantu, dok su varijacije u vremenu kretanja vozila između stajališta zanemarene. Kao jedan od osnovnih elemenata modela, autori su definisali vremena zadržavanja vozila na stajalištu kao funkciju broja ulazaka putnika i broja izlazaka putnika iz vozila. Eberlein i ostali autori u radu su ponderima definisali različit uticaj ulazaka i izlazaka putnika na vreme zadržavanja vozila na stajalištu, isti pristup su imali i Lin i Wilson (Lin i Wilson, 1992). Navedeni pristup problemu zadržavanja vozila na stajalištu radi izmene putnika distancira ovaj model od većine modela (Newell i Potts, 1964; Vučić, 1969; Andersson i ostali, 1979; Boyd, 1983; Marguier, 1985; Hickman, 2001; Bellei i Gkoumas, 2010; Xuan, Argote, i Daganzo, 2011; Daganzo, 2009; S.-X. He 2015) gde je vreme zadržavanja vozila na stajalištu definisano samo kao funkcija ulazaka putnika. Za definisanje vremena zadržavanja vozila na stajalištu radi izmene putnika autori su koristili sledeće determinisane parametare po stajalištima: stepen pristizanja putnika, udeo izlazaka putnika i interval sleđenja. Korišćenje determinističkih parametara za stohastičke procese Eberlein i ostali autori pravdali su činjenicom da se razvijeni model koristi za proračune u veoma kratkim vremenskim intervalima na osnovu podataka koji su dobijeni u realnom vremenu (AVL – automatsko lociranje vozila, APC – automatski brojači putnika). Kratki vremenski intervali ne pružaju mogućnost da ulazni parametri modela značajnije odstupaju od srednjih vrednosti.

U knjizi „Public Transit Planning and Operation“, Ceder je na osnovu prethodno predstavljenih uzroka i izvora poremećaja u intervalu sleđenja i varijacija u vremenu kretanja vozila duž linije, predstavio analitički model za predikciju vremena putovanja vozila duž trase linije za slučaj postojanja poremećaja u intervalu sleđenja. Model se sastoji iz dva podmodela. Prvi podmodel je stohastički i njime se vrši predikcija vremena kretanja vozila

između stajališta. Drugi podmodel vrši proračun vremena zadržavanja vozila na stajalištu, a klasifikuje se u determinističke linearne modele. Proračun zadržavanja vozila na stajalištu se vrši na osnovu sledećih parametara: vremenski gubici, broj nakupljenih putnika po stajalištima, broj putnika koji izlazi po stajalištima, prosečno vreme potrebno za ukrcavanje putnika, prosečno vreme potrebno za izlazak putnika iz vozila. Prednosti navedenog modela se ogledaju u dodatnim vremenskim gubicima koje je model obuhvatio: vreme potrebno za otvaranje i zatvaranje vrata, vreme potrebno za promenu režima izmene putnika (iz izlaska u ulazak) kod vozila sa jednim vratima, vreme potrebno vozaču da se uključi u saobraćaj (Ceder, 2007).

Za potrebe primene strategije upravljanja vozilom u realnom vremenu na autobuskoj liniji Delgado je formirao deterministički model. Delgado je u radu koristio dve strategije upravljanja: dodatno zadržavanje vozila na stajalištu i ograničenje ulazaka putnika (ograničenje ulazaka se vrši i za slučaj kada ima slobodnog mesta u vozilu, a sa ciljem kraćeg vremena zadržavanja vozila na stajalištu). Ciljna funkcija modela je minimizovanje vremena putovanja putnika, od momenta dolaska putnika na stajalište do izlaska iz vozila. Budući da je vreme kretanja vozila između stajališta Delgado posmatrao kao konstantu, modelom je minimizirano vreme čekanja putnika na stajalištu i vreme zadržavanja vozila na stajalištu. Determinističkim modelom je definisano vreme polaska vozila „k“ sa stajališta „n“ u uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja vozila, na osnovu: intenziteta nakupljanja putnika po stajalištima, srednjeg intenziteta ulazaka putnika u vozilo, međustaničnih rastojanja, brzine putovanja vozila između stajališta, kapaciteta vozila. Osnovne pretpostavke u modelu su: intenzitet pristizanja putnika na svakom stajalištu i vreme kretanja vozila između stajališta se ne menjaju u posmatranom periodu vremena, vreme zadržavanja vozila na stajalištu zavisi od vremena potrebnog za ulazak putnika u vozila, a vreme izlaska putnika se zanemaruje, vozila se ne preteču i zaustavljaju se na svakom stajalištu. Za razliku od prethodno navedenih determinističkih modela u kojima su korišćene prosečne vrednosti intenziteta nakupljanja putnika na liniji, Delgradov model kao vrednosti parametara koristi intenzitet nakupljanja putnika i brzine kretanja vozila za svako stajalište odnosno međustanično rastojanje posebno. Ovo dodatno komplikuje matematički model, pa je rešavanje problema vršeno u programu Minos (Delgado i ostali, 2009).

U svom radu Chen i ostali su razvili simulacioni model za poboljšanje ravnomernosti intervala sleđenja koristeći dve strategije: (I) zadržavanje vozila na stajalištu i (II) korekciju brzine kretanja vozila. Simulacioni model na osnovu informacija u realnom vremenu predviđa pojavu neprihvatljivog poremećaja intervala sleđenja vozila i zatim koristi jednu od navedenih strategija za smirivanje poremećaja. Kao osnovu simulacionog modela, autori su razvili deterministički model koji definiše veličinu poremećaja intervala sleđenja vozila po stajalištima duž linije na osnovu varijacija zadržavanja vozila na stajalištu i varijacija u vremenu kretanja vozila između stajališta. Osnovna ideja autora je da se na osnovu veličine navedenih varijacija generiše odluka o primeni odgovarajuće strategije. U determinističkom modelu vreme zadržavanja vozila na stajalištu definisano je kao izbor veće vrednosti vremena dva procesa: vremena ulaska putnika u vozilo i vremena izlaska putnika iz vozila. Varijacije u vremenu kretanja vozila između stajališta su definisane razlikom vremena

kretanja posmatranog vozila i vozila koje mu prethodi. Analizirajući deterministički model autori su između ostalog zaključili: proces kumuliranja poremećaja intervala sleđenja je posledica dinamičke interakcije između putnika i vozila; proces kumuliranja započinje inicijalnim poremećajem koji nastaje kao varijacija u vremenu kretanja vozila između stajališta ili varijacija u vremenu zadržavanja vozila na stajalištu (W. Chen i ostali 2012).

### 2.1.2 Stohastički pristup

Veći broj istraživača je koristio stohastičke modele za definisanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila (Andersson i ostali, 1979; Marguier, 1985; Hickman, 2001; Bellei i Gkoumas, 2010; Yin, Lam, i Miller, 2004; Daganzo, 1997; Daganzo, 2009; Daganzo i Pilachowski, 2011; S.-X. He 2015; Carey, 1994).

Na osnovu pregledane literature najviše primenjivani stohastički model, kojim se opisuje kretanje vozila duž linije u uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja su razvili Andersson i Scalia-Tomba (Andersson i ostali, 1979). Neravnomernost u intervalu sleđenja vozila potiče od uticaja mešovitog toka i stohastičke prirode nakupljanja putnika. Stohastičko modelovanje je korišćeno kako bi se povećala realističnost modela. Marguier je kasnije usavršio navedeni model, koji je zatim poslužio kao osnova za analiziranje upotrebe različitih mera i strategija za povećanje pouzdanosti usluge JGPP-a. Marguier-ov model je u kasnijim istraživanjima koristio veći broj autora (Hickman, 2001; Bellei i Gkoumas, 2010).

Marguier-ov model opisuje kretanje vozila na jednoj liniji uz sledeće pretpostavke (Marguier, 1985):

- Interval sleđenja je manji od 12 minuta,
- Nakupljanje putnika se vrši po Poasonovoj raspodeli,
- Vreme čekanja putnika zavisi od intervala sleđenja,
- Izlazak i ulazak putnika se vrši jednovremeno (vreme zadržavanja vozila zavisi od broja putnika koji ulaze u vozilo),
- Raspodela izlazaka putnika po stajalištima se ne menja tokom vremena i broj izlazaka putnika po stajalištu definisan je verovatnoćom izlaska putnika i brojem ukupno prevezenih putnika,
- Vreme kretanja vozila između stajališta definisano je srednjom vrednošću i varijansom,
- Broj pridošlih putnika za vreme zadržavanja vozila na stajalištu je zanemarljivo malo.

Bellei i Gkoumas su istraživali uticaj intervala sleđenja, koeficijenta iskorišćenja mesta u vozilu i vremena putovanja vozila na funkciju raspodele intervala sleđenja vozila duž jedne linije javnog prevoza putnika. Oni su unapredili (Hickman, 2001) stohastički model uključujući sledeće karakteristike: vreme zadržavanja vozila na stajalištu, ograničenje kapaciteta vozila i pristizanje putnika na stajalištu za vreme stajanja vozila. Parametri i forma funkcije raspodele intervala sleđenja je utvrđena na osnovu histograma dužine intervala sleđenja



vozila, koji je dobijen na osnovu uzoraka intervala sleđenja na glavnim stajalištima duž linije. Autori su došli do zaključka da bimodalna raspodela najbolje predstavlja interval sleđenja za oba slučaja i za rezultate simulacije unapređenog modela i za posmatrane podatke (Bellei i Gkoumas, 2010).

Na mreži linija BRT sistema Yin i ostali su vrednovali pouzdanost usluge javnog prevoza koristeći Monte Karlo pristup u okviru razvijenog stohastičkog modela. Autori su vrednovali i upoređivali rezultate pouzdanosti usluge na osnovu tri različita parametra: vreme poluobrta, ravnomernost intervala sleđenja i vreme čekanja putnika na stajalištu. Istraživanje je pokazalo da se navedenim parametrima ne dobijaju kontradiktorni rezultati (Yin, Lam, i Miller, 2004).

## 2.2 OPTIMIZACIJA I UPRAVLJANJE RAVNOMERNOŠĆU INTERVALA SLEĐENJA

Optimizacija linijskih sistema javnog gradskog prevoza putnika u oblasti ravnomernosti intervala sleđenja vozila prvi put je istraživana pre 50 godina, a poslednje dve decenije predstavlja značajno polje u naučnim istraživanjima. Veliki broj istraživača bavio se kontrolom i upravljanjem ravnomernosti intervala sleđenja, uglavnom kroz matematičke ili empirijske modele, koristeći različite strategije i mere za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila na liniji. Razvoj savremenih informacionih sistema u oblasti transporta i njegova ekonomska pristupačnost omogućila je jednostavno prikupljanje podataka o stanju sistema u realnom vremenu, 24-sata, 365 dana u godini, što je olakšalo kontrolu ravnomernosti intervala sleđenja vozila i omogućilo upravljanje poremećajima u realnom vremenu. Dostupnost informacija o stanju sistema u realnom vremenu istraživači su uglavnom iskoristili za razvoj strategija za upravljanje poremećajima intervala sleđenja na operativnom nivou, dok se pregledom dostupne literature može zaključiti da su zanemarena istraživanja u oblasti stvaranja otpornosti sistema na poremećaje u fazi projektovanja linija.

Postojeće strategije upravljanja poremećajem intervala sleđenja se mogu podeliti u dve grupe (Zolfaghari, Azizi, i Jaber, 2004):

- **Upravljanje na planskom nivou** – dugoročna strategija koja zahteva izmene na trasi linije i redu vožnje,
- **Upravljanje u realnom vremenu** – kratkoročna strategija na operativnom nivou sa ciljem da se poveća nivo usluge (uključivanje dodatnog vozila, prekid poluobrta-okretanje vozila i zadržavanje vozila).

Upravljanje poremećajem intervala sleđenja vozila na planskom nivou Nes van Oort je podelio na upravljanje na strateškom nivou i upravljanje na taktičkom nivou (Niels van Oort, 2011). Upravljanje poremećajem intervala sleđenja vozila na strateškom nivou odnosi se na optimizaciju infrastrukturnih elemenata (raskrsnice, saobraćajnice, dizajn terminusa, dizajn stajališta) i optimizaciju statičkih elemenata linije (dužina linije, trasa linije, raspored i broj

stajališta i dr). Upravljanje poremećajem intervala sleđenja vozila na taktičkom nivou odnosi se na optimizaciju dinamičkih elemenata i drugih parametara koji utiču na izradu reda vožnje.

Upravljanje poremećajem intervala sleđenja vozila u realnom vremenu zasniva se na informacijama u realnom vremenu. Informacije u realnom vremenu su između ostalog korišćene za strategije upravljanja zadržavanjem vozila na stajalištima (Ding i Chien, 2001; Eberlein, Wilson, i Bernstein, 2001; Dessouky i ostali, 2003; Jiamin Zhao, Bukkapatnam, i Dessouky, 2003; Sun i Hickman, 2008; Bartholdi i Eisenstein, 2012; Delgado i ostali, 2009; Delgado, Munoz, i Giesen, 2012; Xuan, Argote, i Daganzo, 2011; Muñoz i ostali, 2013; S.-X. He 2015) i za strategije upravljanja između stajališta kao što su signali prioriteta na raskrsnicama (Furth i Muller, 2000; Chang i ostali, 2003; McLeod i Hounsell, 2003; Ceder, 2007; Diakaki i ostali, 2003; Kraus i ostali, 2010; N. van Oort, Boterman, i van Nes, 2012; Q. He, Head, i Ding, 2014).

Upravljanje u realnom vremenu je detaljnije klasifikovan na osnovu dva glavna obeležja (Delgado, F., Muñoz, J.C., Giesen, 2015):

- I. mesta primene strategije i
- II. nivoa informacija potrebnih za primenu strategije.

Strategije upravljanja u realnom vremenu prema mestu primene se dele na (Eberlein, Wilson, i Bernstein, 2001; Delgado i ostali, 2009; O.J. Ibarra-Rojas i ostali, 2015):

- na stajalištu (zadržavanje vozila, preskakanje stajališta, ograničen ulazak putnika, vožnja bez putnika i okretanje vozila),
- između stajališta (preticanje vozila JP, kontrola brzine, signali prioriteta na raskrsnicama), i
- ostale mehanizme upravljanja (npr. dodavanje vozila).

U zavisnosti od nivoa informacija, strategije se mogu podeliti na lokalno upravljanje poremećajem i sistemsko upravljanje poremećajem (Delgado, F., Muñoz, J.C., Giesen, 2015). Strategije za lokalno upravljanje poremećajem zahtevaju manje informacija u odnosu na sistemsko upravljanje a potrebne informacije se uglavnom odnose na prethodno vozilo. Strategiju za lokalno upravljanje poremećajem su prikazali Fu i Yang (Fu i Yang, 2002). Od kraja XX veka koriste se informacije u realnom vremenu koje su omogućile naprednije korišćenje strategija za upravljanje poremećajem na nivou celog sistema.

### **2.2.1 Mere i strategije na planskom nivou**

Turnquist i Bowman su sprovedi jedno od prvih istraživanja uticaja strukture mreže linija i statičkih elemenata linije na pouzdanost usluge. Oni su između ostalog istraživali faktore koji utiču na grupisanje vozila. Radijalne mreže linija JGPP-a upoređivane su sa ortogonalnom mrežom, pri čemu je broj vozila za realizaciju usluge bio ograničen. U radu je merena pouzdanost usluge za različite kombinacije gustine mreže linija i frekvencije vozila na linijama. Pouzdanost usluge je merena sledećim parametrima: standardna devijacija

tačnosti dolazaka vozila na stajalište i koeficijent varijacije tačnosti dolazaka. Rezultati sprovedenih istraživanja pokazali su da je vreme vožnje putnika u ortogonalnim mrežama duže nego u radijalnim, ali je pouzdanost usluge veća. Takođe ortogonalne mreže pružaju veći stepen pouzdanosti kod putovanja sa presedanjem. Autori su zaključili da koncentracija presedanja u centralnom čvoru radijalnih mreža stvara dodatnu nepouzdanost, u odnosu na ravnomernu raspoređenost presedanja kod ortogonalne mreže. Autori su između ostalog zaključili i da je pouzdanost usluge osetljivija na frekvenciju vozila na liniji, nego na gustinu mreže linija. Kao mere za povećanje pouzdanosti usluge, autori u ovom radu predložili su povećanje prioriteta autobusima na raskrsnicama i uvođenje saobraćajnih traka rezervisanih za vozila javnog prevoza (Turnquist i Bowman, 1980).

### *Saobraćajne trake rezervisane za JP*

Stepen interakcije podsistema javnog gradskog prevoza sa ostalim vidovima površinskog saobraćaja utiče na vreme kretanja vozila između stajališta. Kod sistema javnog gradskog prevoza koji podrazumevaju potpuno nezavisnu trasu (row A), varijabilnost vremena kretanja vozila između stajališta je zanemarljiva (Vučić, 2005). Kod zavisnih i delimično zavisnih trasa (row B i row C) tokovi mešovitog saobraćaja imaju nespornan uticaj na kretanje vozila javnog gradskog prevoza (Simeunović i ostali, 2016). Tokovi mešovitog saobraćaja stvaraju poremećaje intervala sleđenja vozila, ali ne utiču na njegovo kumuliranje.

Uvođenjem posebnih traka za površinske podsisteme JGPP-a smanjuju se varijacije vremena kretanja vozila između stajališta i vremena uključivanja zaustavljenog vozila u saobraćajni tok, što direktno utiče na postizanje višeg nivoa pouzdanosti usluge (Barker i ostali, 2004; Vučić, 2005; Ceder, 2007).

Saobraćajne trake rezervisane za vozila JGPP-a, zajedno sa projektovanim prioritetom na semaforisanim raskrsnicama, jedne su od najčešće istraživanih i primenjivanih mera za smanjivanje varijacija u kretanju vozila između stajališta (Levinson, 2005; Jepson i Ferreira, 1999; McLeod i Hounsell, 2003; Barker i ostali, 2004; Vučić, 2005; Ceder, 2007).

Ceder je predstavio rezultate uvođenja navedenih mera u 6 evropskih gradova i njihov uticaj na vremena poluobrta i broj prevezenih putnika. Najveći efekti primenjenih mera su zabeleženi u Atini gde je broj prevezenih putnika povećan za 10% (Ceder, 2007).

Nash je pružio praktične rezultate primenjivanih mera u Cirihu. Primenjene mere su obuhvatale: trake rezervisane za vozila javnog prevoza, unapređenje regulisanja saobraćaja, davanje prioriteta vozilima javnog prevoza na semaforisanim raskrsnicama (Nash, 2003).

Shalaby je programskim simulacijama utvrdio promene u nivou usluge saobraćajnica koje nastaju uvođenjem traka rezervisanih za vozila javnog prevoza, kao i njihov uticaj na funkcionisanje JGPP-a. Nakon implementacije zasebnih traka za vozila javnog prevoza, rezultati simulacije pokazali su da su se performanse autobusnog prevoza poboljšale, dok je nivo usluge za ostale motorizovane vidove smanjen. Upotreba rezervisanih traka od strane

taksi vozila ne utiče značajno na performanse autobusnog prevoza, dok se nivo usluge za ostale motorizovane vidove značajno poboljšava (Shalaby, 1999).

### *Strategija davanja prioriteta vozilima JGPP-a na signalisanim raskrsnicama*

Davanje prioriteta vozilima JGPP-a na signalisanim raskrsnicama može značajno da smanji varijacije u vremenu kretanja vozila između stajališta. Selektivna primena navedene strategije koristan je alat za smirivanje nastalih poremećaja u intervalu sleđenja. Veliki broj istraživača bavio se ovom problematikom (Chang i ostali, 2003; Ceder, 2007; Furth i Muller, 2000; Diakaki i ostali, 2003; Kraus i ostali, 2010; N. van Oort, Boterman, i van Nes, 2012; Q. He, Head, i Ding, 2014).

Strategija davanja prioriteta na signalisanim raskrsnicama optimizuje protok saobraćaja kroz raskrsnicu definišući kombinaciju faza u ciklusu rada semafora koje na osnovu najave i procenjenog vremena nailaska vozila javnog prevoza daju prednost određenom toku. Ova strategija zavisi od tri glavna elementa: (I) procene kašnjenja vozila javnog prevoza, (II) vrednovanje prioriteta (često je bazirano na broju putnika u vozilima), (III) problem optimizacije rada semafora. Pored apsolutnog prioriteta (vozila javnog prevoza nikada ne treba da se zaustave na raskrsnici), istraživan je i uslovni prioritet (Furth i Muller, 2000). Kod uslovnog prioriteta samo vozila koja kasne dobijaju prednost u raskrsnicama, a ostala vozila javnog prevoza moraju da čekaju.

Diakaki je u svom radu je istraživao povećanje prosečne brzine putovanja vozila kao posledicu davanja prioriteta na signalisanim raskrsnicama vozilima javnog prevoza. Primenjena strategija se sastojala od 4 modula: podeljeno upravljanje, ciklusno upravljanje, „offset“ upravljanje, prioritet javnom prevozu. Strategija je testirana na mreži linija u Jerusalimu. Rezultati istraživanja pokazali su da bi se primenom navedene strategije u odnosu na postojeće stanje prosečno vreme putovanja vozila duž linije smanjilo za 65% (Diakaki i ostali, 2003).

Kraus je primenio prethodno opisanu strategiju na mreži linija u gradu Maxae (Brazil) i prosečna brzina putovanja vozila na mreži linija je povećana za 25% (Kraus i ostali, 2010).

Van Oort je istraživao istovremenu primenu zadržavanja autobusa na stajalištima i davanja prioriteta autobusima na signalisanim raskrsnicama. Osnovni cilj u radu je smanjenje troškova koji nastaju zbog kašnjenja putnika i zadržavanja vozila na stajalištima. Relevantnost istraživanja je opravdana zbog problema koji nastaju u slučaju kada se koristi samo strategija zadržavanja vozila. Često se događa da vozila budu zadržana na stajalištu (kao deo strategije), a zatim na sledećoj raskrsnici čekaju za prolazak kroz raskrsnicu. Dve strategije su predložene: (I) polazak vozila sa stajališta kada kontroler raskrsnice da prioritet toku na zahtev autobusa, (II) kontrolisani polazak sa stajališta kako bi se izbeglo čekanje na semaforu. Analiza je pokazala da je kontrolisani polazak najbolja strategija u uslovima malih prevoznih zahteva i funkcionisanja javnog prevoza u mešovitom toku, a preporučuje se kada postoje zasebne saobraćajne trake za vozila javnog prevoza (N. van Oort, Boterman, i van Nes, 2012).

He i ostali autori su primenili multi-modalni pristup strategiji davanja prioriteta vozilima JGPP-a na signalisanim raskrscinama. Oni su formirali ciklus sa otvorenom petljom. Faza u ciklusu koja daje prioritet vozilima javnog prevoza uključuje se samo na prethodnu najavu nailaska vozila. Rezultati istraživanja su pokazali da predloženi model smanjuje prosečno vreme kašnjenja autobusa za 24,9%, naročito u uslovima niskog nivoa usluge ulične mreže (Q. He, Head, i Ding, 2014).

### *Međustanična rastojanja*

Van Nes je između ostalog istraživao uticaj međustaničnih rastojanja na pouzdanost usluge JP. Jedan od najvećih izvora varijacija vremena kretanja vozila duž linije je vreme ukrcavanja/iskrcavanja putnika. Razlike u vremenu zadržavanja vozila na stajalištu se javljaju između ostalog i zbog odstupanja u broju putnika po stajalištima duž linije. Broj nakupljenih putnika na stajalištu između ostalog zavisi i od međustaničnog rastojanja. Ukoliko nema izmene putnika na stajalištu, vozilo se ne zadržava, odnosno ne postoji vreme potrebno za ukrcavanje/iskrcavanje putnika. Prilikom projektovanja mreže linija treba obratiti pažnju na ove varijacije u vremenu ukrcavanja/iskrcavanja kako bi se utvrdio optimalni razmak između stajališta. Sa aspekta pouzdanosti usluge najbolje je da uvek postoji izmena putnika na stajalištu, kako bi se vozilo uvek zaustavilo na stajalištu i smanjile varijacije u vremenu zadržavanja vozila na stajalištu, odnosno kako bi se sprečila pojava većih poremećaja u intervalu sleđenja vozila. Optimalno rastojanje između stajališta ima svoje nedostatke, ali prilikom projektovanja mreže linija i treba uzeti u obzir i pouzdanost usluge (van Nes, 2002).

### *Dužina linije*

Prema dostupnoj literaturi mali broj autora je istraživao uticaj dužine linije na ravnomernost intervala sleđenja vozila i pouzdanost usluge (Daganzo, 1997; Levinson, 2005; Niels van Oort, 2011). Autori su uglavnom dužinu linije posmatrali u korelaciji sa brojem stajališta na liniji. U skladu sa tim, u daljem tekstu će biti predstavljena malobrojna istraživanja uticaja dužine linije i broja stajališta na pouzdanost usluge.

Levinson je istraživao pouzdanost usluge i istorijski razvoj metoda za povećanje pouzdanosti usluge. Autor je istakao četiri ustaljene veze između pojedinih parametara i pouzdanosti linije: (I) Autobuske linije dugačkih trasa, visokog stepena iskorišćenja, koje saobraćaju u mešovitom toku, imaju veoma nizak stepen pouzdanosti; (II) Poremećaj intervala sleđenja koji nastane na početku linije ima tendenciju širenja duž linije; (III) Kod linija sa velikim intervalima sleđenja bitna je tačnost, a kod linija sa malim intervalima sleđenja vozila bitna je ravnomernost; (IV) Pouzdanost usluge i brzinu prevoza na autobuskim linijama je moguće poboljšati smanjivanjem broja stajališta na liniji, smanjivanjem vremena zadržavanja vozila na stajalištima i smanjivanjem uticaja mešovitog saobraćaja na kretanje vozila između stajališta (Levinson, 2005).

Studijom slučaja konkretnih linija u Hagu, Nes van Oort je istraživao uticaj dužine linije na pouzdanost usluge. Autor je delio trase linija veće dužine, a zatim je na osnovu stvarnih

podataka analizirao pouzdanost usluge i vreme putovanja putnika. Cilj predložene optimizacije bio je smanjenje vremena putovanja putnika. Podela linije je vršena na dva načina. Kod prvog načina tačka podele je birana na osnovu karakteristika izmene putnika duž linije, a drugi način je podrazumevao podelu linije na dva jednaka dela. Rezultati istraživanja su pokazali da se podelom linije povećava pouzdanost usluge. Prosečno dodatno vreme putovanja po putniku zavisi između ostalog od dužine linije i broja presedanja. Studijom slučaja u Hagu pokazano je da linije veće dužine imaju veći stepen nepouzdanosti usluge. Deljenjem linija povećava se pouzdanost usluge, smanjuje se vreme čekanja putnika na stajalištu, i smanjuje se vreme koje putnik provede u vozilu. Izborom optimalne tačke presedanja smanjeni vremenski gubici kompenzuju vreme presedanja. Vremenske gubitke nastale usled neravnomernosti intervala sleđenja moguće je smanjiti za oko 30 %, kada se linija podeli na stajalištu sa malim protokom putnika (Niels van Oort, 2011).

### *Određivanje vremena poluobrta*

U fazi projektovanja linije JGPP-a određivanje vremena obrta i prolaznih vremena na stajalištima ima veliki značaj za pouzdanost sistema. Pravilno određeno vreme obrta obuhvata i kašnjenja koja mogu nastati usled neplanskog povećanja opterećenja linije, kao i uticaja mešovitog toka. Da bi se sprečilo kašnjenje vozila zbog neplanskih vremenskih zadržavanja tokom obrta neophodno je određivanje zaštitnog vremena (slack time). Zaštitno vreme se koristi kao mera prevencije, ali i kao osnova za korišćenje pojedinih strategija na operativnom nivou (npr. zadržavanje vozila).

Za iste uložene resurse predimenzionisano zaštitno vreme smanjuje prevoznu brzinu, efikasnost i kapacitet linije, dok nedovoljno zaštitno vreme omogućava nastanak i dalje širenje poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu. Veliki broj istraživača bavio se optimizacijom zaštitnog vremena i vremena obrta (Lesley, 1975; Newell, 1977; Carey, 1998; Zhao, Dessouky, i Bukkapatnam, 2006; N. van Oort, Boterman, i van Nes, 2012; Daganzo, 1997; Ceder, Hassold, i Dano, 2013; Ceder, 2007; W. Chen i ostali, 2012; Omar J. Ibarra-Rojas, López-Irarragorri, i Rios-Solis, 2015, Hollander, 2006).

Lesley je u radu predstavio proceduru za izradu realnog reda vožnje, za linije na kojima se prati kretanje autobusa. Za svako stajalište stepen pouzdanosti utvrđuje se na osnovu varijanse intervala sleđenja vozila. Stajališta na kojima je stepen pouzdanosti dva puta veći od proseka biraju se kao tačke za sprovođenje strategije zadržavanja vozila. Zaštitno vreme računa se posebno za svaku tačku (Lesley, 1975).

Newell je razvio metod za određivanje zaštitnog vremena za svaku tačku na kojoj se primenjuje strategija zadržavanja vozila. Metodom se izračunava donja granica zaštitnog vremena, sa ciljem smanjenja vremena obrta vozila zadržavajući ravnomernost intervala sleđenja. Osnovne dve pretpostavke u radu su: putnici se nakupljaju na stajalištu prema Poasonovoj raspodeli, i kašnjenje autobusa se odvija po Fokker - Planck teoriji. Metod je dodatno pojednostavljen sledećim pretpostavkama: vreme izlazaka putnika ne utiče na

zadržavanje vozila na stajalištu, i korelacija između uzastopnih autobusa ne postoji (Newell, 1977).

Daganzo je u okviru istraživanja pouzdanosti usluge razvio model za određivanje zaštitnog vremena (slack time) u fazi projektovanja vremena obrta. Daganzo navodi da je potreba za korišćenjem zaštitnog vremena posledica varijacije u vremenu putovanja vozila na liniji. On je došao do zaključka da se zaštitno vreme uvećava sa korenom broja stajališta na liniji i da se korekcijom broja stajališta na liniji i smanjenjem dužine linije može pozitivno uticati na pouzdanost usluge (Daganzo, 1997).

Prevozni zahtevi mogu imati visok stepen neravnomernosti u toku dana, ali postoje i periodi ujednačenosti, što značajno može da utiče na efikasnost reda vožnje. Ceder je predstavio postupak za izradu reda vožnje na osnovu izbalansiranih ulazaka putnika. Cederova analitička procedura određuje polaske vozila sa stajališta na osnovu pretpostavke da je pristizanje putnika konstantno u malom periodu vremena (Ceder, 2007).

U svom drugom radu Ceder je predstavio postupak za smanjivanje neravnomernosti u intervalu sleđenja vozila koje potiču od prevoznih zahteva na liniji koristeći vozila različitog kapaciteta. Cilj rada je minimizovanje odstupanja kapaciteta linije od prevoznih zahteva i održavanje ravnomernosti intervala sleđenja. Autor je razvio heuristički pristup određivanju intervala sleđenja na osnovu tri strategije: maksimiziranje kapaciteta vozila, minimiziranje kapaciteta vozila, i određivanje kapaciteta vozila na osnovu prevoznih zahteva. Postupak je testiran na stvarnim podacima i dobijeni rezultati pokazali su da su ciljevi rada u sukobu (Ceder, Hassold, i Dano, 2013).

Sa ciljem povećanja pouzdanosti usluge, u fazi projektovanja linije često se definiše veće zaštitno vreme, što značajno redukuje frekvenciju vozila na liniji. Zhao i ostali izučavali su problem optimizacije zaštitnog vremena u redu vožnje, sa ciljem dobijanja minimalnog vremena čekanja putnika. Koristeći teoriju verovatnoće autori su razvili model zasnovan na D/G/c redovima, kojim su pokazali da je sistem stabilan ako se zaštitno vreme koristi prilikom izrade reda vožnje (Zhao, Dessouky, i Bukkapatnam, 2006).

Yan i ostali su predstavili postupak kojim se minimizira zaštitno vreme u okviru reda vožnje sa ciljem postizanja većeg stepena tačnosti dolazaka vozila u kontrolnim tačkama. Vreme putovanja vozila duž linije u radu predstavljeno je stohastički. Autori su koristili Monte Carlo metodu kako bi minimizirali zaštitno vreme u okviru reda vožnje. Prema pretpostavci u radu, usklađivanje vozila sa redom vožnje vršilo bi se usporavanjem ili ubrzavanjem kretanja vozila nakon prolaska kontrolne tačke (Yan i ostali, 2012).

Podelom dana na periode vrši se usklađivanje prevoznih mogućnosti sa prevoznim zahtevima, koji variraju tokom dana. U okviru definisanih perioda takođe postoje značajne varijacije u prevoznim zahtevima. Usklađivanje prevoznih mogućnosti sa prevoznim zahtevima tokom manjih perioda i sinhronizacija funkcionisanja rada vozila na linijama bili su predmet istraživanja u radu (Omar J. Ibarra-Rojas, López-Irarragorri, i Rios-Solis, 2015). Sinhronizacija je vršena između različitih linija na stajalištima koja su klasifikovana u dve kategorije: tačke opterećenja i tačke presedanja. Rezultati istraživanja pokazali su da se primenom razvijenog modela postiže bolja pouzdanost usluge i sinhronizovanost dolazaka

vozila u istraživanim tačkama, u odnosu na klasičan način organizacije reda vožnje. Bolji rezultati su postignuti i u situacijama kada optimalna sinhronizacija nije dostignuta.

### **2.2.2 Strategije na operativnom nivou**

Strategije na operativnom nivou uglavnom se odnose na strategije u realnom vremenu. Efektivnost različitih strategija na operativnom nivou bio je predmet analize u više radova. Koffman je uporedio nekoliko strategija u realnom vremenu za unapređenje pouzdanosti intervala sleđenja vozila na autobuskoj liniji sa jednom kontrolnom tačkom. Koristeći simulacioni model, autor je ispitao sledeće strategije: zadržavanje vozila, preskakanje stajališta, uvođenje prioriteta za autobuse na semaforisanim raskrsnicama i povećanje tačnosti kretanja vozila sa terminusa. Sve strategije su analizirane u uslovima različitih intervala sleđenja vozila. Rezultati simulacije su pokazali da se najbolji efekti na ravnomernost intervala sleđenja dobijaju sa poslednje dve strategije (Koffman, 1978).

Eberlein i ostali su razmatrali nekoliko strategija upravljanja poremećajem intervala sleđenja: preskakanje dva stajališta, zadržavanje vozila na stajalištu, i kombinaciju ove dve strategije. Autori su razvili matematičke modele za sve navedene strategije pod pretpostavkom da je u realnom vremenu dostupna informacija o lokaciji vozila. Razvijeni modeli su deterministički, ali su takođe ispitivani pod različitim stohastičkim uslovima. Rezultati su pokazali da je kombinacija strategija efikasnija nego kada se strategije zasebno primenjuju (Eberlein, Wilson, i Bernstein, 1999).

#### *Zadržavanje vozila na stajalištu*

Osuna i Newell su sproveli prva istraživanja u oblasti zadržavanja vozila na stajalištu kao strategije za upravljanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila na liniji (Osuna i Newell, 1972; Newell, 1974). Prvi razvijeni modeli su podrazumevali dva vozila na liniji i jednu kontrolnu tačku. Vremenom su razvijeni različiti pristupi u primeni strategije zadržavanja vozila na stajalištu. Delgado i ostali autori u radu (Delgado i ostali, 2009) su strategiju zadržavanja vozila na stajalištu dodatno podelili na dva tipa: uspostavljanje ravnomernosti i uspostavljanje tačnosti. Strategija uspostavljanja ravnomernosti podrazumeva zadržavanje vozila na stajalištu na osnovu podataka o realizovanom i projektovanom intervalu sleđenja, i koristi se na linijama visoke frekvencije gde su intervali sleđenja manji od 10 minuta. Strategija uspostavljanja tačnosti podrazumeva zadržavanje vozila na stajalištu sa ciljem da prolasci vozila kroz kontrolne tačke budu u skladu sa redom vožnje i definisanom tolerancijom.

Zahvaljujući razvoju novih tehnologija za praćenje vozila (AVL), razvijeni su modeli koji koriste određene strategije u realnom vremenu (Eberlein, Wilson, i Bernstein, 2001; Zolfaghari, Azizi, i Jaber, 2004; Delgado, Munoz, i Giesen, 2012; Cortés i ostali, 2010; Daganzo i Pilachowski, 2011; Bartholdi i Eisenstein, 2012; Xuan, Argote, i Daganzo, 2011; Muñoz i ostali, 2013; Q. Chen, Adida, i Lin, 2013; S.-X. He 2015).



Zadržavanje vozila na stajalištu predstavlja najčešće istraživanu strategiju upravljanja poremećajem intervala sleđenja, pri čemu su u literaturi identifikovani različiti pristupi ovom problemu. Hickman je u svom modelu optimizacije (Hickman, 2001) uzeo u obzir stohastičku prirodu operativnih procesa u JGPP-u, dok su Sun i Hickman njihov model (Sun i Hickman, 2008) zasnovali na deterministici. Delgado i ostali autori su u radu (Delgado, Munoz, i Giesen, 2012) analizirali istovremenu primenu nekoliko strategija upravljanja poremećajem intervala sleđenja. Jedan broj autora je strategiju zadržavanja primenjivao samo na jednoj kontrolnoj tački (Eberlein, Wilson, i Bernstein, 2001; Fu i Yang, 2002), dok su drugi autori koristili nekoliko kontrolnih tačaka duž koridora (Sun i Hickman, 2008; Bartholdi i Eisenstein, 2012; Q. Chen, Adida, i Lin, 2013). U jednom broju modela kapacitet vozila je ograničen, odnosno putnici ne mogu da ulaze u vozilo nakon dostizanja maksimalnog kapaciteta vozila (Zolfaghari, Azizi, i Jaber, 2004; Delgado i ostali, 2009; Delgado, Munoz, i Giesen, 2012; Cortés i ostali, 2010).

Abkowitz i ostali autori su odredili postupak za izbor mesta koje je optimalno za strategiju zadržavanja vozila. Rezultati su pokazali da je lokacija mesta za strategiju zadržavanja vozila osetljiva na karakteristike ukrcajanja putnika. Optimalno mesto je obično locirano pre grupe stajališta koja imaju veliki broj ulazaka putnika u vozilo, odnosno pre karakteristične deonice linije (M. Abkowitz, Eiger, i Engelstein, 1986).

Abkowitz i Lepofsky su sprovedi prva istraživanja vezana za strategiju upravljanja poremećajem u realnom vremenu koja minimizira ukupno vreme čekanja. Ovom strategijom se zadržavaju autobusi na određenim stajalištima dok se ne ostvari minimalan vremenski razmak između dva vozila. Strategija je primenjena na dve linije javnog prevoza u SAD-u. Na osnovu dobijenih rezultata autori su zaključili da istraživana strategija treba da se koristi na linijama visoke frekvencije gde se nakupljanje putnika vrši nevezano za red vožnje. Izbor stajališta za zadržavanje vozila treba vršiti na osnovu karakteristika izmene putnika (M. D. Abkowitz i Lepofsky, 1990).

Fu i Yang su predstavili model koji minimizira varijacije intervala sleđenja vozila sa ciljem minimiziranja vremena čekanja putnika na stajalištu. Vremenski gubici putnika koji se nalaze u vozilu i kapacitet vozila nisu uzeti u obzir. Zadržavanje vozila se vrši na proizvoljnom stajalištu. Rezultati su pokazali da je optimalnije primeniti zadržavanje na jednom stajalištu. Sun i Hickman rešavaju isti problem sa zadržavanjem više vozila, ali na tačno definisanim kontrolnim stajalištima. Autori su pokazali da se ravnomernost intervala sleđenja vozila može povećati ako se zadržavanje primeni na različitim stajalištima, a ujedno se smanjuju troškovi. Sun i Hickman model predstavlja bolje rešenje kada se uporedi sa zadržavanjem vozila na jednom stajalištu (Fu i Yang, 2002; Sun i Hickman, 2008).

Zolfaghari i ostali autori su razvili model koji minimizira vreme čekanja putnika na stajalištu i vreme čekanja putnika koji se nisu ukrkali u vozilo zbog ograničenog kapaciteta. Ovaj model koristi ograničen kapacitet vozila, ali nije uzeo u obzir vremenske gubitke putnika usled dodatnog zadržavanja vozila na stajalištu (Zolfaghari, Azizi, i Jaber, 2004).

Daganzo je predstavio postupak upravljanja poremećajem intervala sleđenja vozila sa ciljem postizanja ravnomernog intervala sleđenja vozila održavajući što veću prevoznu

brzinu. Strategija upravljanja dinamički utvrđuje vremena zadržavanja na kontrolnim tačkama na jednoj liniji, na osnovu informacije o vremenu dolaska prethodnog autobusa u realnom vremenu. U radu je dokazano da je predstavljeni postupak efikasan kod malih poremećaja intervala sleđenja, pri čemu se sa rastom poremećaja smanjuje efikasnost modela. Xuan je razmatrao sličan problem, pri čemu je predložio strategiju zadržavanja vozila kako bi regulisao intervale sleđenja sa ciljem maksimizacije komercijalne brzine vozila. Uz pretpostavku postojanja informacije u realnom vremenu o trenutnoj poziciji autobusa, autori tvrde da njihov model postiže bolje rezultate (Daganzo, 2009; Xuan, Argote, i Daganzo, 2011).

Za razliku od prethodno navedenih radova u kojima je izučavana strategija zadržavanja vozila sa težnjom da se dostigne projektovana tačnost ili ravnomernost intervala sleđenja, Bartholdi i Eisenstein su u svom radu razvili drugačiji pristup problemu zadržavanja vozila koji ne zahteva projektovani red vožnje na posmatranoj liniji. Model je razvijen za linije visoke frekvencije, gde se nakupljanje putnika vrši nezavisno od reda vožnje i za slučajeve kada nastanu veliki poremećaji i nagle promene u redu vožnje. Model podrazumeva rad vozila na liniji sa dinamičkim intervalom sleđenja, koji se samo reguliše u skladu sa prevoznim zahtevima, uslovima u saobraćaju, brojem vozila na radu i kapacitetima vozila. Autori tvrde da njihov model teži ka izjednačavanju postignutih intervala sleđenja vozila na liniji u realnom vremenu i to proračunom odgovarajućeg vremena zadržavanja vozila na kontrolnim tačkama. U skladu sa uslovima na liniji, model teži ka minimizaciji zajedničkog intervala sleđenja i minimizaciji devijacije intervala sleđenja. Praktičnost primene ovog modela autori objašnjavaju činjenicom da model ne zahteva komplikovane i ekonomski zahtevne sisteme automatskog brojanja putnika, komunikacije između vozila i dr., već samo klasičan AVL sistem zasnovan na GPS tehnologiji standardne preciznosti. Za upravljanje sistemom javnog prevoza treba odrediti dva parametra: osetljivost sistema na poremećaj intervala sleđenja i minimalni interval sleđenja sa kojima će vozila biti uključivana u sistem. U slučaju nastanka poremećaja intervala sleđenja, uključivanja ili isključivanja vozila sa linije, sistem se samoreguliše ka „prirodnom“ intervalu sleđenja. Simulacijom funkcionisanja linije 63 u Čikagu, autori su uporedili njihov model organizacije rada linije sa klasičnim strategijama za upravljanje poremećajem, pri čemu je model samoregulacije intervala sleđenja pokazao najbolje rezultate u održavanju ravnomernosti intervala sleđenja vozila (Bartholdi i Eisenstein, 2012).

Kombinacija strategije zadržavanja vozila na stajalištu sa drugim strategijama za upravljanje poremećajem intervala sleđenja vozila prikazan je u radu „How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance?“ (Delgado, Munoz, i Giesen, 2012). Autori su razvili deterministički model koji kombinuje strategiju zadržavanja vozila sa strategijom ograničenog ulaska putnika u vozilo (ograničava se broj putnika koji će ući u autobus čak i kada nisu popunjeni kapaciteti). Funkcija cilja u modelu uzima u obzir: vreme čekanja putnika na stajalištima, vreme provedeno u autobusu tokom procesa zadržavanja vozila, i dodatno vreme čekanja putnika kao posledicu ograničenog kapaciteta autobusa ili strategije ograničenja ulazaka putnika. Razvijena optimizacija ne koristi celobrojne promenljive, tako da je pogodna za primenu u realnom vremenu. Autori u radu upoređuju

efekte primene strategije zadržavanja vozila sa kombinovanom strategijom (zadržavanja vozila i ograničenog ulaska). Analiza je pokazala da u uslovima visokih frekvencija i visokog koeficijenta iskorišćenja kapaciteta primena kombinovane strategije smanjuje vreme čekanja za 69%, dok korišćenje samo strategije zadržavanja smanjuje ukupno vreme čekanja za 61%. U slučaju kada kapacitet ne predstavlja problem i postoji visoka frekvencija usluge postižu se slični rezultati. Slični rezultati se postižu i u uslovima niskih frekvencija vozila na liniji. Još jedna prednost predstavljenog modela je mogućnost autobusa da se kreće duž linije smanjenim koeficijentom iskorišćenja kapaciteta vozila, osiguravajući uravnotežen rad i postižući veći stepen komfora (Delgado, Munoz, i Giesen, 2012).

Primenu strategije zadržavanja vozila više autobuskih linija koje funkcionišu na jednom koridoru prvo je razmatrana u radu „Analysis of real-time control strategies in a corridor with multiple bus services“ (Hernández i ostali, 2015). Autori su za osnovu njihovog modela iskoristili prethodno opisan deterministički model optimizacije koji je razvio Delgado (Delgado i ostali, 2009; Delgado, Munoz, i Giesen, 2012). Autori su usavršili Delgadov model optimizacije, tako što je model prilagođen za korišćenje u uslovima funkcionisanja sistema JGPP-a sa više autobuskih linija na jednom koridoru. U Hernandezovom modelu na svakoj liniji nezavisno se vrši zadržavanje vozila. Postupak optimizacije Hernández je razmatrao u dva slučaja. Prvi slučaj je kada se na svakoj liniji zasebno gleda korist i vozila imaju informaciju o položaju autobusa konkurentne linije. Kod drugog slučaja se posmatra za svaku liniju vreme čekanja putnika zasebno, i ne postoji informacija o lokaciji autobusa konkurentne linije. Cilj ovog rada je da se identifikuju prednosti koje se mogu ostvariti kada postoji centralna koordinacija koja izvršava strategije zadržavanja vozila za sve autobuske linije u odnosu na situaciju kada se upravlja svakom linijom nezavisno. Centralnom koordinacijom strategije zadržavanja vozila za slučaj postojanja više linija na jednom koridoru dobijeni su bolji rezultati u odnosu na slučaj kada se posmatra svaka linija zasebno.

### *Strategija preskakanja stajališta*

Preskakanje stajališta direktno se koristi za povećanje prevozne brzine, a indirektno se može koristiti kao strategija za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila sa ciljem smanjivanja zaostatka vozila u odnosu na red vožnje ili smanjivanje intervala sleđenja vozila. Osnovni problem razvoja ove strategije predstavlja izbor stajališta koje treba preskočiti, pri čemu su autori koristili različite kriterijume: prosečno vreme čekanja na stajalištu, troškove rada i dr.

Fu i ostali autori su predstavili strategiju preskakanja stajališta u realnom vremenu, koja minimizira ukupne troškove čekanja. Autori su razvili matematički model kojim se na osnovu prethodna dva obrta i trenutnih zahteva putnika definiše koja stajališta treba preskočiti. Problem je rešen primenom „Rolling time horizon“ pristupa. Autori rada tvrde da su strategije preskakanja stajališta efektivnije na autobuskim linijama sa visokim prevoznim zahtevima, malim intervalima sleđenja vozila i umerenim poremećajima intervala sleđenja. (Fu, Liu, i Calamai, 2003).

Sun i Hickman predlažu korišćenje strategije preskakanja stajališta kako bi se minimizovalo vreme čekanja putnika, ali i omogućilo putnicima da izađu iz vozila na stajalištima koja treba da budu preskočena. Strategija preskakanja stajališta formulisana je kao problem nelinearnog programiranja. Rezultati simulacije pokazali su da stepen smanjenja vremena čekanja putnika zavisi od distribucije prevoznih zahteva putnika duž linije (Sun i Hickman, 2005).

Cortés i ostali autori razvili su model za upravljanje koji predviđa brzinu autobusa i primenu odgovarajuće strategije (preskakanje stajališta ili zadržavanje autobusa), sa ciljem minimiziranja vremena čekanja putnika na stajalištu i minimiziranjem vremena koje putnik provede u vozilu. Autori su problem rešili genetskim algoritmima, a rezultati simulacije su pokazali da se primenom predložene strategije ukupno vreme putovanja putnika smanjuje za 10% do 20% (Cortés i ostali, 2010).

Takashi Nagatani je u svom radu istraživao problem uparivanja vozila usled pojave inicijalnog poremećaja. Kao rešenje problema uparivanja vozila Nagatani predlaže meru preskakanja stajališta, kada poremećaj intervala sleđenja dostigne kritičnu vrednost ( $t_s$ ). Autor je izvršio kompjutersku simulaciju tri varijante modela: (A) postojeći model bez preskakanja, (B) preskakanje stajališta kada poremećaj intervala sleđenja dostigne kritičnu vrednost  $t_s$  i (C) preskakanje stajališta i povećanje brzine vozila kada poremećaj intervala sleđenja dostigne kritičnu vrednost  $t_s$ . Analizom linearne stabilnosti sistema, autor je zaključio da se najbolja stabilnost postiže varijantom C (Nagatani, 2001).

### *Strategija regulacija brzine*

Chandrasekar i ostali autori razvili su strategiju za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja koja se bazira na upravljanju brzinom kretanja autobusa između stajališta. Predložena strategija podrazumeva samo smanjivanje trenutne brzine kretanja vozila, a ne povećanje brzine kretanja. Glavna ideja u ovom radu je da se strategija zadržavanja vozila na stajalištu zameni regulacijom brzine kretanja vozila između stajališta. Autori tvrde da primenom navedene strategije putnici neće primetiti promenu u vremenu putovanja, što nije slučaj kada se autobus zadržava na stajalištu. U radu je pokazano da se kontrolom brzine autobusa mogu smanjiti poremećaji u intervalu sleđenja vozila (Chandrasekar, Long Cheu, i Chin, 2002).

Daganzo i Pilachowski su predstavili strategiju upravljanja brzinom kretanja autobusa sa ciljem sprečavanja grupisanja vozila. Za održavanje projektovanog rastojanja između vozila, Daganzo-Pilachowski razvili su model kojim se regulišu brzine kretanja autobusa na osnovu informacija u realnom vremenu o pozicijama vozila na liniji. Ovakvo kooperativno upravljanje se pokazalo efektivnim u sprečavanju grupisanja vozila (Daganzo i Pilachowski, 2011).

### **3 POUZDANOST USLUGE I POREMEĆAJ INTERVALA SLEĐENJA VOZILA**

U savremenim urbanim sredinama efikasan javni gradski prevoz putnika jedan je od najvažnijih segmenata održivog razvoja, koji ima veliki uticaj na funkcionisanje celokupnog saobraćajnog sistema, mobilnost, cene zemljišta, itd. Konkurentnost sistema JGPP-a u odnosu na putnički automobil obezbeđuje se kroz povećanje kvaliteta usluge. Pouzdanost usluge kao jedan od osnovnih aspekata kvaliteta usluge zavisi od: tačnosti dolazaka vozila, stepena ravnomernosti intervala sleđenja vozila, nerealizovanih polazaka i dr. (Barker i ostali, 2004).

Na linijama JGPP-a gde su intervali sleđenja vozila manji od 15 minuta ravnomernost intervala sleđenja vozila predstavlja ključni parametar za vrednovanje pouzdanosti usluge. Usled velikog broja nepredvidivih faktora, nastanak poremećaja u intervalu sleđenja vozila sasvim je uobičajen u sistemu JGPP-a, kao i činjenica da se neravnomernost povećava sa brojem pređenih stajališta. Da bi se obezbedio zadovoljavajući nivo ravnomernosti intervala sleđenja neophodno je korišćenje različitih mera i strategija sa ciljem smirivanja nastalih poremećaja, kao i stvaranja otpornosti sistema na nastajanje i širenje neravnomernosti intervala sleđenja vozila.

U okviru ovog poglavlja kroz analizu osnovnih elemenata linijskih sistema biće predstavljen: interval sleđenja vozila, osnovne karakteristike intervala, klasifikacija poremećaja intervala, faktori koji utiču na nastanak poremećaja intervala, uticaj poremećaja intervala sleđenja na putnika, parametri za merenje pouzdanosti usluge, strategije i mere za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila.

#### **3.1 OSNOVNI ELEMENTI RADA LINIJE**

Sistem JGPP-a, bez obzira na primenjenu tehnologiju podsistema, najčešće se organizuje kao linijski. Funkcionisanje linijskih sistema JGPP-a je u osnovi definisano

mrežom linija i redom vožnje, koji daju vremensku i prostornu sliku o kretanju vozila na liniji. Pri tome je osnovni cilj da se projektuju takvi prevoznici kojima će se zadovoljiti prevoznici zahtevi putnika uz prihvatljivo vreme čekaanja na stajalištima i minimalne moguće troškove eksploatacije.

Mreža linija je određena statičkim elementima linija, kao što su: trasa linije, dužina linije, stajališta, terminusi i gravitaciono područje linije.

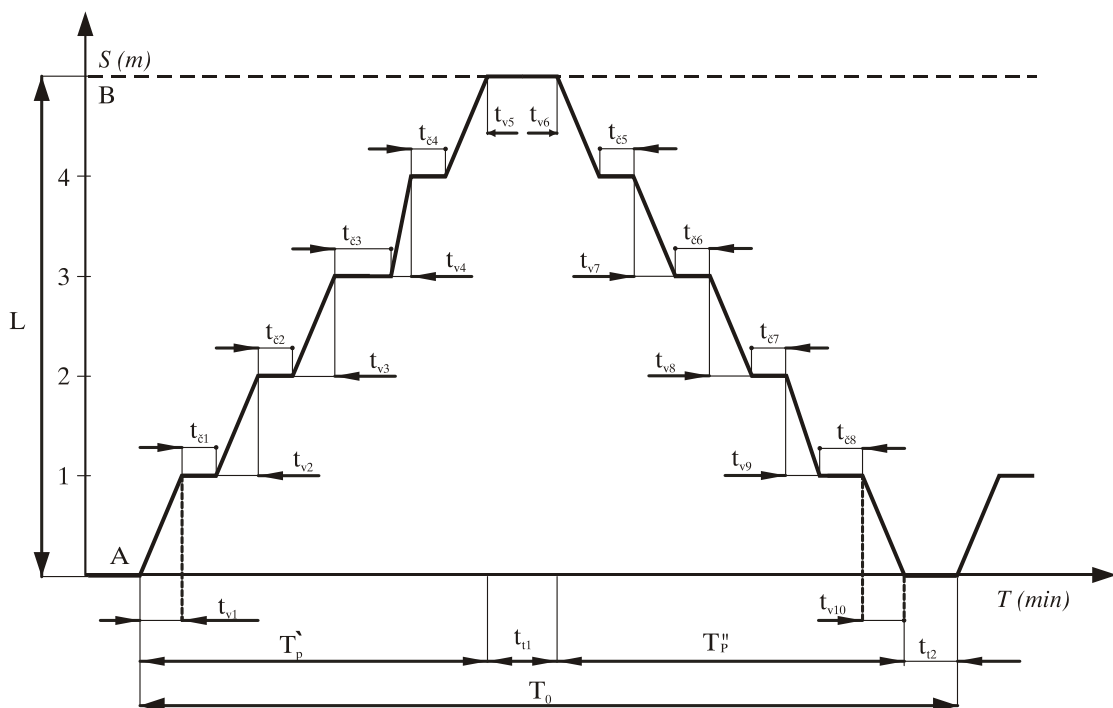
Dinamički elementi linije utvrđuju se redom vožnje i menjaju se u skladu sa promenama prevoznih zahteva na liniji ili normi kvaliteta prevozne usluge. Pod pojmom prevoznici zahtevi na liniji podrazumeva se broj putnika koji se prevozi na svim deonicama duž linije i izražava se protokom putnika duž linije. Protok putnika je broj prevezenih putnika na nekoj deonici linije u određenom vremenskom periodu, najčešće izražen brojem putnika po času. Protok putnika, pored statičkih elemenata, predstavlja jedan od najbitnijih parametara za definisanje dinamičkih elemenata linije.

U dinamičke elemente linije ubrajaju se: broj vozila na liniji, vreme obrta, brzina obrta, interval i frekvencija vozila na liniji i prevozna sposobnost linije (Banković, 1994).

U daljim podpoglavljima biće detaljnije predstavljeni i analizirani samo elementi rada linije od značaja za izradu modela u ovom radu.

### 3.1.1 Vreme obrta

Vreme obrta se može definisati kao vremenski period između dva uzastopna polaska istog vozila sa terminusa. Vreme obrta se sastoji od vremena vožnje između stajališta, vremena zadržavanja vozila na stajalištima i vremena provedenog na polaznom odnosno završnom terminusu.



Slika 3.1 Dijagram put–vreme prilikom kretanja vozila na liniji (Banković, 1994)

$$T_o = \sum t_v + \sum t_s + \sum t_t, \text{ [min]} \quad (3.1)$$

gde je:

$$\sum t_v = t_{v1} + t_{v2} + \dots + t_{vn} \text{ [min]} - \text{suma vremena vožnji između stajališta}$$

$$\sum t_s = t_{s1} + t_{s2} + \dots + t_{sn} \text{ [min]} - \text{suma vremena čekanja na stajalištima}$$

$$\sum t_t = t_{t1} + t_{t2} \text{ [min]} - \text{suma vremena čekanja na oba terminusa}$$

Vreme obrta je moguće izračunati na osnovu poznavanja dužine linije i brzine obrta na osnovu sledeće relacije.

$$T_o = \frac{L_{AB} + L_{BA}}{V_o} \cdot 60 = \frac{2 \cdot L}{V_o} \cdot 60, \text{ [min]} \quad (3.2)$$

Vreme obrta je moguće izraziti i na osnovu vremena vožnje za jedan i drugi smer linije i vremena provedenog na terminusima, odnosno na osnovu relacije:

$$T_o = T'_p + T''_p + \sum t_t, \text{ [min]} \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Interval sleđenja vozila na liniji

Interval sleđenja predstavlja jedan od najznačajnijih dinamičkih elemenata linije, kako sa gledišta organizacije prevoza, tako i sa gledišta kvaliteta prevoza značajnog za putnike. Interval sleđenja se može definisati kao vremenski razmak između dva uzastopna vozila na liniji, odnosno vremenski razmak između prolaska dva uzastopna vozila kroz kontrolnu tačku na liniji (Banković, 1994).

$$i = \frac{T_o}{N_r}, \text{ [min]} \quad (3.4)$$

gde je:  $i$  – interval sleđenja;  $T_o$  – vreme obrta vozila;  $N_r$  – broj vozila na liniji.

Interval se takođe može izraziti i kao recipročna vrednost frekvencije ( $f$ ):

$$i = \frac{60}{f}, \text{ [min]} \quad (3.5)$$

Interval sleđenja vozila ima granične vrednosti. Pod minimalnim intervalom podrazumeva se najmanje moguće vreme sleđenja dva uzastopna vozila koje se može dozvoliti u eksploataciji. To nije minimalni tehnički interval koji zavisi od brzine kretanja vozila i od mogućnosti kočenja vozila, već minimalni eksploatacioni interval koji zavisi od uslova eksploatacije, a u prvom redu od propusne sposobnosti stajališta. U praksi se kao minimalna teoretska vrednost intervala sleđenja uzima jedan minut. Gornja granica intervala dostiže se

kada na liniji radi samo jedno vozilo, pa je u tom slučaju maksimalna vrednost intervala jednaka vremenu trajanja obrta.

### **3.2 POREMEĆAJI U REDU VOŽNJE**

Pri realizaciji reda vožnje pojavljuju se subjektivni i objektivni problemi, zbog kojih dolazi do odstupanja od planiranog režima kretanja vozila. Pod pretpostavkom dobro projektovanog i realnog reda vožnje na regularnost kretanja vozila utiču, manje ili više, zagušenost saobraćaja, kvarovi na vozilima, saobraćajne nezgode i drugo.

Kako se redom vožnje planira vreme polaska, odnosno dolaska vozila, i interval sleđenja između pojedinih vozila, to se i kontrola sprovođenja reda vožnje sastoji od provere tačnosti i ravnomernosti.

Pod tačnošću se podrazumeva prolazak vozila (jedne ili više linija) kroz kontrolne tačke tih linija u vremenu predviđenom redom vožnje, dok se pod ravnomernošću podrazumeva prolazak vozila jedne linije kroz kontrolne tačke te linije u intervalima predviđenim redom vožnje (Banković, 1994).

Ravnomernost i tačnost mogu biti u sledećim odnosima:

- Dobra tačnost i dobra ravnomernost
- Loša tačnost i dobra ravnomernost
- Loša tačnost i loša ravnomernost

Tačnost dolazaka vozila na stajališta se najčešće koristi za vrednovanje pouzdanosti, međutim na linijama sa visokom frekvencijom usluge za putnike bitnija je ravnomernost intervala sleđenja vozila. Karakter linije javnog prevoza i način nakupljanja putnika određuje način vrednovanja pouzdanosti usluge (Barker i ostali, 2004).

### **3.3 KLASIFIKACIJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA**

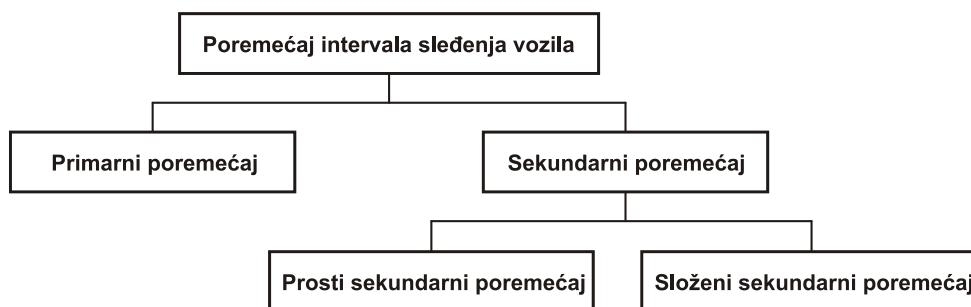
U idealnim uslovima sistem JGPP funkcioniše sa ravnomernim intervalom sleđenja vozila. Tokom realizacije reda vožnje razlika koja nastane između projektovanog i realizovanog intervala sleđenja predstavlja poremećaj intervala sleđenja vozila. Do nastanka primarnog poremećaja intervala sleđenja dolazi usled negativnog uticaja određenih faktora na pojedine vremenske komponente planiranog vremena obrta. Promene u vremenskim komponentama obrta vozila mogu se tolerisati do određenih granica. U odsustvu kontramera za smirivanje nastalog poremećaja intervala sleđenja vozila, nastale neravnomernosti intervala šire se duž linije i prenose na naredne polaske u redu vožnje. Sekundarni poremećaji posledica su širenja i slaganja primarnih poremećaja i oni se mnogo teže otklanjaju zbog njihovog progresivnog uvećanja.

Poremećaji intervala sleđenja vozila dele se na primarne poremećaje i sekundarne poremećaje. Na osnovu sprovedenih istraživanja širenja, prenošenja i slaganja poremećaja intervala sleđenja u sistemu JGPP-a, izvršena je dodatna podela sekundarnih poremećaja



intervala sleđenja na proste sekundarne poremećaje i složene sekundarne poremećaje (Slika 3.2).

Prosti sekundarni poremećaji nastaju progresivnim širenjem jednog primarnog poremećaja u sistemu JGPP-a, pri čemu se širenje poremećaja vrši po stajalištima duž linije i po polascima u redu vožnje. Složeni sekundarni poremećaji su posledica slaganja i kombinovanja više primarnih i/ili prostih sekundarnih poremećaja.



Slika 3.2 Klasifikacija poremećaja intervala sleđenja vozila

U praksi se najviše pažnje posvećuje otklanjanju uzroka primarnih poremećaja, jer oni prouzrokuju nastanak sekundarnih poremećaja, koji se zbog progresivnog uvećanja mnogo teže otklanjaju.

### 3.4 FAKTORI NASTANKA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA

Na nastanak poremećaja intervala sleđenja utiču različiti faktori koji se između ostalog mogu posmatrati u odnosu na vremenske elemente kretanja vozila duž linije, na koje utiču i u odnosu na izvor nastanka. Prema izvoru nastanka, posmatrano u odnosu na sistem javnog gradskog prevoza, faktori se dele na unutrašnje i spoljašnje.

Tokom realizacije reda vožnje, a usled dejstva spoljašnjih ili unutrašnjih faktora, dolazi do odstupanja pojedinih vremenskih elemenata kretanja vozila duž linije u odnosu na projektovane vrednosti. Odstupanja se najčešće javljaju kod: vremena polaska sa terminusa, vremena vožnje između stajališta, ili vremena zadržavanja na stajalištu.

#### 3.4.1 Tačnost polazaka sa terminusa

Tačnost polazaka vozila sa terminala predstavlja odstupanje vremena otpremanja vozila sa terminala u odnosu na vreme definisano redom vožnje, pri čemu se kao posledica loše tačnosti najčešće javlja poremećaj intervala sleđenja. Na tačnost polazaka sa terminusa utiču sledeći unutrašnji faktori:

- *Dostupnost posade i vozila* - Da bi se krenulo na vreme neophodno je da vozač i vozilo budu dostupni i spremni na vreme. Kašnjenja vozila na prethodnim poluobrtima mogu dovesti do kašnjenja polaska,

- *Dizajn i kapacitet terminala* – Dizajn i kapacitet terminala mogu imati značajan uticaj na kašnjenje vozila pri polasku,
- *Kvalitet reda vožnje* – U postupku izrade reda vožnje korišćeno vreme vožnje između terminusa kao i vreme terminiranja može imati značajan uticaj na kašnjenje vozila. Vreme terminiranja se može iskoristiti za kompenzovanje kašnjenja sa prethodnog poluobrtu
- *Broj vozila i broj linija koje opslužuje terminus.*

### **3.4.2 Varijacije vremena vožnje između stajališta**

Vreme vožnje predstavlja jedan od glavnih elemenata u neslaganju između projektovanog i realizovanog stanja u sistemu JGPP-a. Unutrašnji faktori koji utiču na vreme vožnje između stajališta su:

- *Ponašanje vozača* - Način vožnje svakog vozača razlikuje se i stvara varijabilnost u vremenu vožnje između stajališta,
- *Konfiguracija mreže linija* - Konfiguracija mreže linija može imati uticaj na varijabilnost kretanja vozila. Dugačke trase linija, preklapanje više trasa linija, samo su neki od elemenata koji mogu prouzrokovati varijabilnost kretanja vozila. Fizička integracija linija i koordinisano presedanje omogućavaju da se poremećaji u vremenu kretanja vozila prenose između linija,
- *Kvalitet reda vožnje* - Usklađenost prolaznih vremena na kontrolnim tačkama u redu vožnje sa stvarno ostvarivim prolaznim vremenima takođe utiče na varijabilnost kretanja vozila između stajališta.

Spoljašnji faktori su:

- *Kapacitet ulične mreže i raskrsnica* - Efekti ovog faktora u velikoj meri zavise od stepena zavisnosti trase linija javnog prevoza u odnosu na površinski saobraćaj. Uticaj ovog faktora značajan je na raskrsnicama i na opterećenim deonicama. Dodatna odstupanja u vremenu vožnje mogu nastati usled interakcije vozila javnog gradskog prevoza sa pešacima na pešačkim prelazima,
- *Vremenski uslovi*- Različiti vremenski (klimatski) uslovi i ponašanje vozača shodno njima mogu dovesti do varijabilnosti vremena vožnje između stajališta.

### **3.4.3 Varijacije vremena zadržavanja vozila na stajalištu**

Varijacije vremena zadržavanja na stajalištu važan su faktor koji utiče na ravnomernost sleđenja vozila. Proces zadržavanja vozila na stajalištu sastoji se od sledećih elemenata: kočenje, otvaranje vrata, izmena putnika, zatvaranje vrata i ubrzavanje. Analizom ovog procesa mogu se odrediti sledeći faktori varijabilnosti vremena zadržavanja vozila na stajalištu:

Unutrašnji faktori:

- *Ponašanje vozača* - Ponašanje vozača po pitanju otvaranja i zatvaranja vrata i dužina čekanja zakasnelih putnika,
- *Dizajn vozila* – Broj i pozicija vrata, niskopodna vozila omogućavaju minimalno vreme zadržavanja na stajalištima. Dizajn vozila, zavisno od ponašanja putnika, može uticati na varijabilnost vremena zadržavanja na stajalištima,
- *Dizajn i kapacitet stajališta* – Nedovoljan kapacitet stajališta u odnosu na projektovanu frekvenciju dolazaka vozila produžava vreme zadržavanja vozila na stajalištu. Dizajn stajališta utiče na ponašanje putnika. Dizajnom se mogu rasporediti putnici na platformi i omogućiti optimalno vreme izmene putnika,
- *Sistem naplate i režim izmene* - Sistem naplate utiče na vremena zadržavanja vozila na stajalištima. Sistemi kod kojih se ne vrši kontrola naplate prilikom ulaska u vozilo omogućavaju nabrže izmene, dok sistemi kod kojih vozač putniku vrši naplatu prevoza spada za najsporije. Novije tehnologije naplate podrazumevaju elektronski sistem naplate pomoću smart kartica kojima se može ostvariti zavidna brzina naplate i ulaska putnika u vozilo. Sistem naplate i režim ulaska i izlaska putnika iz vozila značajno može da ubrza izmenu i smanji varijabilnost zadržavanja vozila na stajalištu.

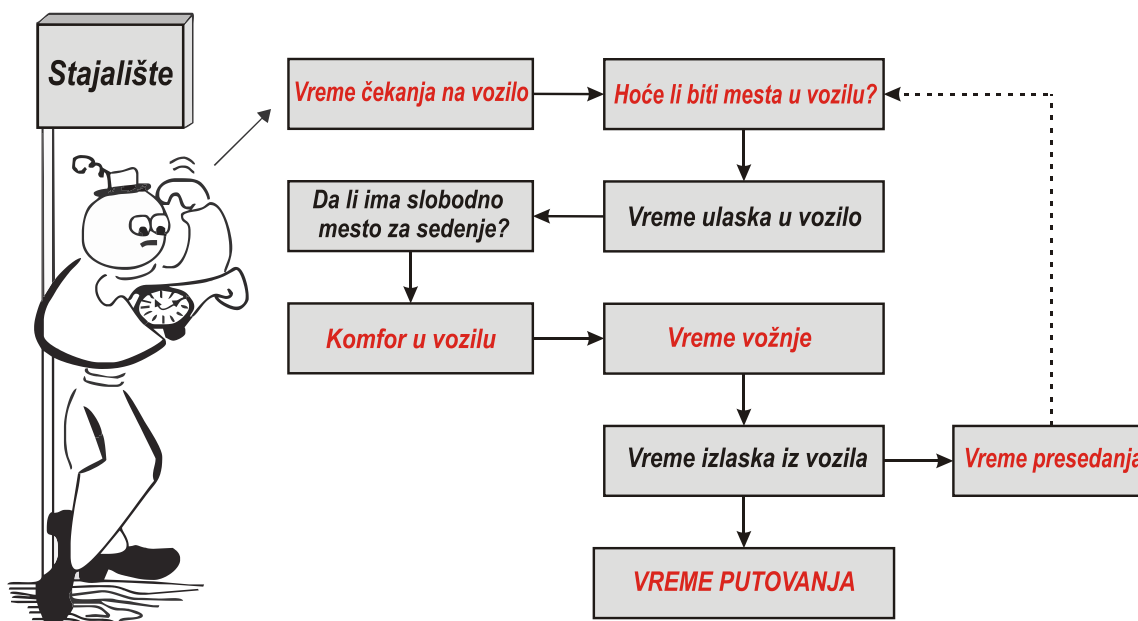
Spoljašnji faktori:

- *Ponašanje putnika* - Različite kategorije putnika (godine, prtljag) ukrcavaju se različitim brzinama,
- *Neravnomernost prevoznih zahteva po vremenu i po stajalištima duž linije* - Neravnomernost broja putnika koji se ukrcavaju i iskrcavaju po stajalištima duž linije generiše različita vremena zadržavanja vozila po stajalištima.

### 3.5 UTICAJ POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA NA PUTNIKA

Pored negativnog uticaja na operativno funkcionisanje sistema JGPP-a (produženo vreme obrta, kašnjenje vozila za naredni polazak, vožnja preko kapaciteta, grupisanje vozila i dr.) , neravnomernost intervala sleđenja vozila negativno utiče i na sledeće aspekte putovanja putnika (Slika 3.3):

- Prosečno vreme putovanja putnika,
- Neizvesnost vremena putovanja putnika,
- Komfor putnika u vozilu.



Slika 3.3 Parametari od interesa za putnika u uslovima niske pouzdanosti usluge

Produženo prosečno vreme putovanja, neizvesnost vremena putovanja putnika i smanjeni nivo komfora putnika u vozilu dovodi do sledećih izmena u ponašanju putnika:

- U okviru sistema JGPP-a
  - promena vremena polaska,
  - promena početnog stajališta putovanja,
  - promena izlaznog stajališta,
  - promena rute (druga linija, dodatna presedanja i dr.)
- Izvan sistema JGPP-a
  - promena vida prevoza,
  - promena ili otkazivanje putovanja.

### 3.5.1 Vreme putovanja putnika

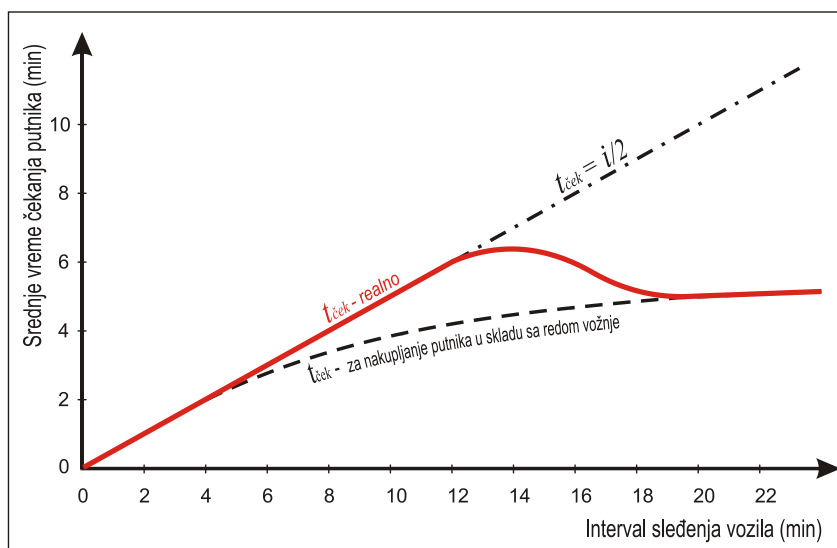
Vreme putovanja putnika u sistemu JGPP-a se sastoji iz sledećih vremenskih komponenti:

1. vreme pristupa sistemu (vreme pešačenja od izvora do pristupnog stajališta),
2. vreme čekanja,
3. vreme vožnje,
4. vreme presedanja i
5. vreme pešačenja od izlaznog stajališta do cilja.

Vreme pristupa korisnika sistemu i vreme kretanja korisnika od izlaznog stajališta do cilja zavise od statičkih elemenata linija, dok neravnomernost intervala sleđenja vozila nema uticaja na ove vremenske komponente putovanja putnika. U strukturi vremena putovanja, neravnomernost intervala sleđenja utiče na vreme čekanja putnika na stajalištu i vreme vožnje putnika.

Vreme čekanja putnika na stajalištu je direktna funkcija realizovanog intervala sleđenja vozila na linijama sa intervalom sleđenja manjim od 15 minuta i predstavlja posledicu prirode nakupljanja putnika na stajalištima. Karakteristike nakupljanja putnika na stajalištima značajno se razlikuju po projektovanim intervalima sleđenja vozila.

U knjizi kojoj (Vučić, 2005) predstavio je vezu između prosečnog vremena čekanja putnika i veličine intervala sleđenja za uslove: nasumičnog nakupljanja putnika, nakupljanja putnika u skladu sa redom vožnje i stvarnog nakupljanja putnika (Slika 3.4). Sa slike se može zaključiti da se nakupljanje putnika za intervale manje od 13 minuta vrši isključivo nasumično i tada je prosečno vreme čekanja putnika na stajalištu jednako polovini intervala sleđenja, dok se kod intervala sleđenja većih od 18 minuta nakupljanje putnika vrši prema redu vožnje, nekoliko minuta pre polaska.



Slika 3.4 Srednje vreme čekanja putnika u funkciji intervala sleđenja vozila (Vučić, 2005)

Minimalno očekivano vreme čekanja putnika na stajalištu za slučaj ravnomernih intervala sleđenja definiše se kao vremenski period koji iznosi polovinu intervala sleđenja vozila. Ovako definisano vreme čekanja ima apsolutnu tačnost u uslovima ravnomernog nakupljanja putnika na stajalištima. Kako se iz definicije matematičkog očekivanja vremena čekanja podrazumeva ravnomeran interval, svako produženje intervala sleđenja ima za posledicu produženje vremena čekanja u odnosu na minimalno očekivano.

Prema rezultatima istraživanja na mreži linija u Novom Sadu, nakupljanje putnika na gradskim linijama gde su intervali sleđenja manji od 15 minuta vrši se nasumično. Vreme čekanja putnika direktno zavisi od standardne devijacije poremećaja intervala, to znači da je produženo vreme čekanja putnika u direktnoj korelativnoj vezi sa poremećajem intervala sleđenja. Produženje vremena čekanja putnika predstavlja gubitak vremena i značajno utiče na pogoršanje kvaliteta prevozne usluge (Simeunović, 2001).

Produženo vreme vožnje putnika u uslovima neravnomernog intervala sleđenja vozila posledica je i dužeg zadržavanja vozila na stajalištima u odnosu na planirano. Produženo vreme vožnje putnika postoji u uslovima neravnomernog intervala sleđenja, ali nije izraženo kao produženo vreme čekanja putnika na stajalištu i mnogo teže se kvantifikuje.

Vreme vožnje putnika direktno zavisi od vremena putovanja vozila JGPP-a duž linije, a vreme putovanja vozila duž linije sastoji se od vremena vožnje između stajališta i vremena zadržavanja vozila na stajalištu. U uslovima neravnomernog intervala sleđenja vozila, kada vozilo usled postojanja primarnog poremećaja intervala sleđenja počne da kasni u odnosu na red vožnje, produžava se i vreme zadržavanja vozila na svakom stajalištu, što utiče kako na putnike koji se nalaze na stajalištima, tako i na putnike u vozilima JGPP-a. Efekat produženog zadržavanja vozila na stajalištu teško se vrednuje iz više razloga:

- vreme zadržavanja vozila na stajalištu razlikuje se po stajalištima duž linije i zavisi od većeg broja parametara (broja putnika koji ulazi/izlazi, režima izmene, načina naplate i dr.),
- vreme zadržavanja vozila na stajalištu nije definisano redom vožnje,
- vreme zadržavanja vozila na stajalištu u odnosu na ostale vremenske komponente vremena obrta vozila traje kratko.

Budući da u uslovima neravnomernog intervala sleđenja postoje objektivni problemi kod kvantifikovanja produženog zadržavanja vozila na stajalištu, produženo vreme vožnje putnika kao posledica produženog zadržavanja vozila na stajalištu nije značajnije istraživano u dostupnoj literaturi i biće detaljnije analizirano u ovom radu.

### 3.5.2 Neizvesnost vremena putovanja putnika

Na osnovu prethodne analize vremena putovanja putnika u sistemu JGPP-a može se zaključiti da se u uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja vreme putovanja putnika produžava. Varijacije u vremenu putovanja zavise od velikog broja faktora i nisu predvidive za putnika tako da, u postupku planiranja putovanja JGPP-om, putnik mora da uzme u obzir moguće vremenske gubitke kao zaštitno vreme, kako bi uspešno (bez kašnjenja) stigao do cilja.

Zaštitno vreme u postupku planiranja putovanja postoji i kod drugih vidova prevoza. Subjektivno vrednovanje zaštitnog vremena koje putnik mora da uzme u obzir u sistemu JGPP-a i njegovo poređenje u odnosu na ostale vidove prevoza u velikoj meri utiče na izbor i preferiranje JGPP-a kao vida prevoza u realizaciji putovanja.

### 3.5.3 Komfor putnika u vozilu

Koeficijent iskorišćenja mesta u vozilu  $k_{ik}$  izražava iskorišćenje kapaciteta na najopterećenijoj deonici linije, odnosno na karakterističnoj deonici linije. Karakteristična deonica linije je međustanično rastojanje na kome se javi maksimalan protok putnika  $q_{max}$ , što znači da koeficijent iskorišćenja mesta u vozilu predstavlja najnepovoljnije iskorišćenje prevozne sposobnosti, a izražava se odnosom:

$$k_{ik} = \frac{q_{max}}{Q} \quad (3.6)$$

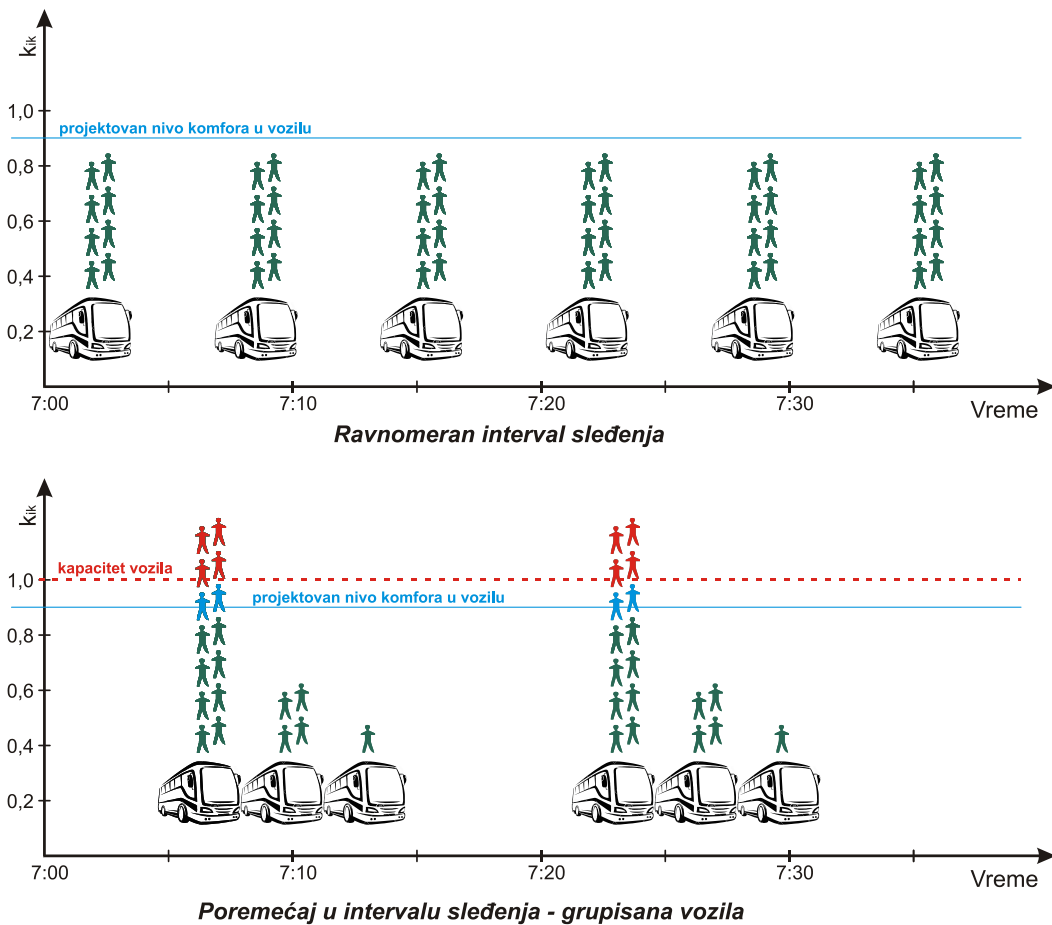
gde je:  $q_{max}$  - maksimalni protok putnika;  $Q$  - prevozna sposobnost linije.

U dosadašnjoj stručnoj literaturi prevladava stav da se koeficijent iskorišćenja mesta u vozilu daje kao normativ za periode vršnih opterećenja i periode van vršnih opterećenja, pri čemu preporučene vrednosti koeficijenta iznose:

- za periode vršnih opterećenja  $k_{ik} = 0,9$  i
- za periode van vršnih opterećenja  $k_{ik} = 0,5 - 0,6$ .

Koeficijent iskorišćenja mesta u vozilu, na način na koji je definisan u literaturi, daje prosečno časovno iskorišćenje ponuđenog broja mesta na najjače opterećenoj deonici linije. Realno je očekivati da će iskorišćenje mesta na najjače opterećenoj liniji biti različito za svako pojedinačno vozilo i u svakom poluostrtu.

Razlike u maksimalnim vrednostima protoka u okviru vršnog časa posmatrane po vozilima iste linije uslovljene su mnogobrojnim faktorima kao što su neravnomernost sleđenja vozila, neravnomernost nakupljanja putnika, uslovi odvijanja ostalog površinskog saobraćaja itd. Faktori koji uslovljavaju realizaciju različitih vrednosti maksimalnih protoka putnika po vozilima pa čak i promenu karakterističnog međustaničnog rastojanja za pojedina vozila iste linije u vršnom času. Kao jedan od najuticajnijih faktora koji dovodi do neravnomernosti maksimalnih vrednosti protoka jeste neravnomernost intervala sleđenja vozila duž linije, pri čemu veoma često dolazi do pojave ugroženosti komfora putnika u vozilima JGPP-a (slika3.5).



Slika 3.5 Prikaz iskorišćenja mesta u vozilu na najopterećenijoj deonici linije za slučaj ravnomernog intervala sleđenja i za slučaj grupisanja vozila

Koeficijent iskorišćenja mesta u vozilu dat kao normativ u uslovima postojanja poremećaja po pravilu manifestuje se preko ugrožavanja komfora jednog broja putnika, a u nekim slučajevima može doći do toga da ne budu zadovoljeni zahtevi putnika za prevozom postavljeni pred sistem. Ovde se pod zadovoljenjem prevoznih zahteva postavljenih pred sistem podrazumeva da putnici koji dođu na stajalište uđu u prvo vozilo koje im dođe, sa izuzetkom u slučaju vanrednih događaja (utakmice, priredbe i sl).

TCQSM kao rešenje problema uticaja neravnomernog intervala sleđenja na komfor putnika predlaže povećanje frekvencije vozila na osnovu koeficijenta varijacije intervala sleđenja prema formuli (Barker i ostali, 2004):

$$f_{eff} = \frac{f}{1 + c_{vh}}, \text{ [vozila/čas]} \quad (3.7)$$

gde je:

$f_{eff}$  – efektivna učestalost (vozila/h),

$f$  – učestalost po redu vožnje (vozila/h) i

$c_{vh}$  – koeficijent varijacija intervala sleđenja (definisano u poglavlju 3.6.2, jednačina (3.10))

### 3.6 PARAMETRI ZA MERENJE POUZDANOSTI USLUGE

U cilju povećanja pouzdanosti usluge JGPP-a neophodno je prvo kvantifikovati pouzdanost usluge, koja se može posmatrati iz dve perspektive: korisnika i upravljača JGPP-om. Kvantifikovanje pouzdanosti usluge iz ugla korisnika komplikovano je zbog heterogene strukture zahteva i stavova korisnika prema sistemu JGPP-a, dok se pouzdanost usluge iz ugla upravljača JGPP-om može kvantifikovati na osnovu nekoliko karakteristika sistema. Tačnost i ravnomernost intervala sleđenja su najčešće vrednovane karakteristike. Pored navedenih karakteristika vrednuju se: nerealizovani polasci, mehanički kvarovi na vozilima i dr.

#### 3.6.1 Parametri za merenje tačnosti

U postupku kvantifikovanja tačnosti prvo je potrebno definisati nekoliko osnovnih parametara:

- mesto (stajalište) kontrole,
- tolerancija tačnosti (vremenske granice tačnosti),
- odrediti da li se posmatraju dolasci ili polasci vozila sa stajališta.

Tačnost se kvantifikuje na lokacijama koje su od interesa za putnike. Izbor lokacije zavisi od karaktera linije i karakteristika tokova na liniji. Na primer, merenje tačnosti na stajalištu u središnjem delu linije je bitnije od merenja na kraju linije. Međutim, ako je poslednje stajalište na liniji tačka presedanja, onda tačnost dolaska ima veliki značaj za putnike koji presedaju (Barker i ostali, 2004).



Određivanje tolerancije tačnosti (vremenske granice) uglavnom zavisi od stepena nezavisnosti trase linije i korišćenog podsistema. Kod podsistema koji imaju stepen nezavisnosti trase A (npr. metro) zahteva se najviši nivo tačnosti. Najniži nivo tačnosti se zahteva od podsistema koji funkcionišu u mešovitom toku. Za autobuski podsistem dobra tačnost je definisana granicama od 0 do 5 minuta (Barker i ostali, 2004). Za putnike koji na stajalište dolaze prema redu vožnje, efekat ranijeg dolaska vozila JGPP-a je jednak kašnjenju vozila za ceo interval sleđenja.

Po ugledu na HCM, TCQSM je definisao nivoe tačnosti usluge javnog prevoza na skali od A do F. Nivo tačnosti usluge javnog prevoza predstavlja udeo polazaka loše tačnosti u ukupnom broju istraživanih polazaka (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 Nivou usluge JP u zavisnosti od stepena tačnosti usluge

Nivo usluge	Tačnost (%)	Napomena
A	95,0-100,0	jedan zakasneli polazak svake dve nedelje
B	90,0-94,9	jedan zakasneli polazak svake nedelje
C	85,0-90,0	tri zakasnela polaska svake dve nedelje
D	80,0-84,9	dva zakasnela polaska svake nedelje
E	75,0-79,9	jedan zakasneli polazak svakog dana
F	<75,0	više od jednog zakasnelog polaska svakog dana

Za izabrno stajalište, odluka o izboru merenja dolazaka ili polazaka vozila sa stajališta zavisi od karakteristika izmene putnika. Tačnost polazaka vozila je važnija na stajalištima gde su dominantni ulasci putnika, dok je tačnost dolazaka bitna na stajalištima gde su dominantni izlasci putnika.

### 3.6.2 Parametri za merenje ravnomernosti

Kvantifikovanje tačnosti se vrši u svim podsistemima JGPP-a koji imaju definisan red vožnje i od izuzetnog je značaja za linije gde je interval sleđenja vozila veći od petnaest minuta. Na linijama sa malim intervalom sleđenja, gde se nakupljanje putnika vrši nezavisno od reda vožnje, loša ravnomernost intervala sleđenja može da dovede do grupisanja vozila i niza negativnih posledica na kvalitet usluge. Budući da loša tačnost ne znači i lošu ravnomernost, na linijama sa malim intervalima sleđenja značajnije je kvantifikovanje ravnomernosti.

Na linijama gde su projektovani intervali sleđenja vozila manji od petnaest minuta, u cilju povećanja pouzdanosti JGPP-a neophodno je kvantifikovati ravnomernosti intervala sleđenja vozila. To je složen proces koji zahteva prostorno-vremensku analizu većeg broja polazaka istovremeno. Sam proces nije precizno definisan stručnom literaturom i kod različitih autora srećemo različite parametre i načine analize. U ovom delu će biti predstavljeni najznačajniji parametri koji su korišćeni u analizi stepena ravnomernosti intervala sleđenja vozila na liniji.

Osnovni parametar je standardna devijacija (STDEV) koja predstavlja apsolutnu meru disperzije intervala sleđenja vozila u odnosu na prosečnu vrednost na nekom stajalištu u definisanom periodu vremena. Prednost ovog parametra je jednostavnost proračuna bez

potrebe poznavanja projektovanog intervala sleđenja. Nedostaci se ogledaju kroz nemogućnost analize za duži vremenski period na nivou jednog stajališta, ukoliko postoje varijacije projektovanog intervala u tom periodu. Najveći nedostatak je činjenica da se dobijena disperzija posmatra u odnosu na srednju vrednost realizovanog intervala, a ne projektovanog intervala sleđenja vozila, kao i da disperzija raste bez obzira da li su intervale veći ili manji od srednje realizovanog intervala.

Koren srednje kvadratne greške (RMSD) je još jedan često korišćeni statistički parametar, koji omogućava merenje razlike između vrednosti intervala projektovanih redom vožnje i stvarno realizovanih. Za razliku od STDEV ovaj parametar meri odstupanje od projektovanih vrednosti, a ne od srednje vrednosti uzorka. (Daganzo, 2009)

$$RMSD_k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (i_j - i_p)^2}{n}} \quad (3.8)$$

gde je:

$RMSD_k$  – koren srednje kvadratne greške za stajalište  $k$

$i_j$  – Vrednost intervala sleđenja vozila  $j$  na stajalištu  $k$

$i_p$  – Projektovana vrednost intervala sleđenja

$n$  – Broj vozila zaustavljenih na stajalištu  $k$  u analiziranom periodu

Jedan od načina da se kvantifikuje ravnomernost intervala sleđenja vozila na jednoj liniji javnog gradskog prevoza putnika je korišćenje procenta pravilnosti devijacije intervala sleđenja (PRDM - Percentage regularity deviation mean) (Niels van Oort 2014).

$$PRDM_k = \frac{\sum_{j=1}^n \left| \frac{i_p - i_j}{i_p} \right|}{n} \quad (3.9)$$

gde je:

$PRDM_k$  – Procenat pravilnosti devijacije intervala sleđenja za stajalište  $k$

$i_j$  – Vrednost intervala sleđenja vozila  $j$  na stajalištu  $k$

$i_p$  – Projektovana vrednost intervala sleđenja

$n$  – Broj vozila zaustavljenih na stajalištu  $k$  u analiziranom periodu

Vrednost PRDM je određena tako da vrednost 0 predstavlja perfektnu ravnomernost, dok vrednost 1 (ili 100%) predstavlja sustizanje (upareni dolazak na stajalište) dva uzastopna vozila na liniji.

TCQSM za merenje ravnomernosti intervala sleđenja predlaže upotrebu koeficijenta varijacije intervala sleđenja vozila ( $C_{vh}$  - coefficient of variation of headways) (Barker i ostali, 2004).

$$C_{vh} = \frac{stdev(\text{intervala sleđenja})}{\text{srednja vrednost projektovanog intervala}} \quad (3.10)$$

Devijacija intervala sleđenja utvrđuje se kao razlika realizovanog i projektovanog intervala sleđenja vozila. Na osnovu dobijenih vrednosti koeficijenta  $C_{vh}$  utvrđuje se nivo ravnomernosti intervala sleđenja od A do F (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 Nivou usluge JP u zavisnosti od stepena ravnomernosti intervala

Nivo usluge	$C_{vh}$	Procenat polazaka ( $h > 0,5 i$ )	Napomena
A	0,00-0,21	<1%	Visok stepen ravnomernosti
B	0,22-0,30	1-10%	Retki polasci sa poremećajem intervala sleđenja
C	0,31-0,39	10-20%	Učestali polasci sa poremećajem intervala sleđenja
D	0,40-0,52	20-33%	Neravnomerna usluga, sa povremenim grupisanjem vozila
E	0,53-0,74	33-50%	Učestalo grupisanje vozila
F	<0,75	>50%	Konstantno grupisana vozila

Napomena:  $h$  – poremećaj intervala sleđenja;  $i$  – interval sleđenja

### 3.7 STRATEGIJE I MERE ZA POVEĆANJE RAVNOMERNOSTI INTERVALA SLEĐENJA

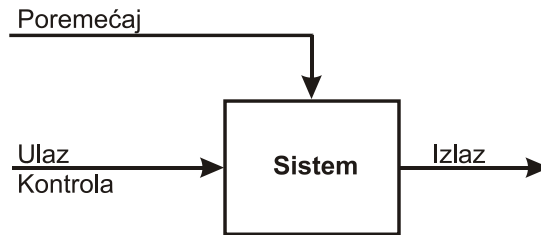
Značaj upravljanja ravnomernošću intervala sleđenja za sistem JGPP-a je nesporan, međutim u stručnoj literaturi je nedovoljno zastupljen. Najveći stručnjaci iz oblasti JGPP-a u svojim radovima iznose različite, često nepotpune klasifikacije i definicije pojedinih metoda za upravljanje poremećajima intervala sleđenja vozila. Danas se u sistemima JGPP-a primenjuje ili razvija veći broj različitih metoda za upravljanje poremećajima sa ciljem povećanja ravnomernosti intervala sleđenja vozila. U daljem tekstu biće predstavljene:

- opšte metode upravljanja sistemima razvijene u okviru Kibernetike,
- mogući načini i metode upravljanja u okviru sistema JGPP-a,
- sistematizacija i klasifikacija primenjenih metoda u praksi i stručnoj literaturi.

#### 3.7.1 Opšte metode upravljanja sistemima

Kibernetika je nauka koja se bavi izučavanjem opštih zakonitosti upravljanja i regulisanja procesa, kao i konverzije, skladištenja i prenosa informacija u sistemima, koji ne zavise od njihove fizičke prirode. Kibernetika ne proučava upravljanje sistemima u statičkom stanju, već u njihovom kretanju i razvoju, tj. proučava dinamičke sisteme. Dinamički sistem je sistem koji u toku vremena menja svoje stanje. Dinamika je ključni element upravljanja jer procesi i kontrolori predstavljaju dinamičke sisteme koji se mogu posmatrati na više različitih načina.

Posmatranje i analiza unutrašnjeg funkcionisanja sistema mora da uzme u obzir osnovne procese i njihove interakcije. U ovom pristupu veoma je važna detaljna analiza strukture sistema kao i analiza promene osnovnih parametara koji opisuju sistem. Interakcija sa okolinom može da se okarakteriše kao poremećaj u sistemu. Posmatranjem odnosa između veličina ulaza i izlaza iz sistema mogu da se odrede karakteristike koje definišu stanje sistema (Slika 3.6). Uspešna primena upravljanja treba da spoji ova dva gledišta i da uključi još i spoljne elemente (Sabanović i Ohnishi, 2011).



Slika 3.6 Šematski prikaz sistema u formi ulaz-izlaz

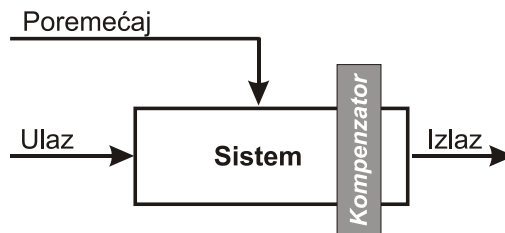
Upravljanje dinamičkim sistemom znači prevođenje sistema iz nekog početnog u zadato stanje. Upravljanje sistemom se sastoji iz sledećih koraka:

1. Posmatranje stanja sistema,
2. Poređenje realnog stanja sistema sa željenim stanjem,
3. Na osnovu rezultata poređenja donosi se odluka,
4. Delovanje na sistem u pravcu smanjenja razlike između realnog i željenog stanja.

U opštem slučaju proces upravljanja sastoji se iz sledeća četiri elementa:

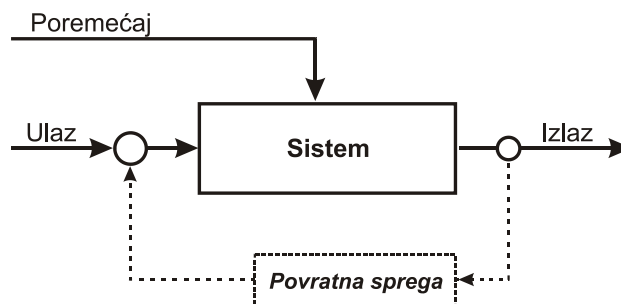
1. Dobijanje informacija o zadacima upravljanja,
2. Dobijanje informacija o ponašanju objekta upravljanja,
3. Analiza dobijenih informacija i donošenje upravljačkih odluka i
4. Izvršenje upravljačke odluke.

Danas su poznata i koriste se tri osnovne metode: upravljanje u otvorenoj sprezi, kompenzacija i upravljanje u povratnoj sprezi.



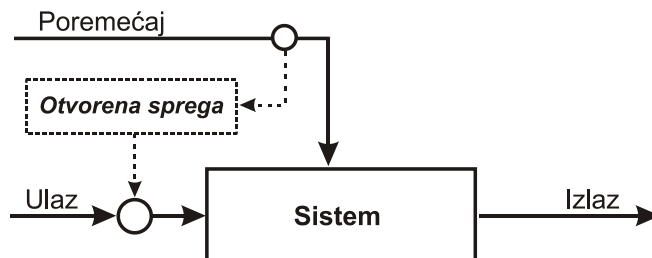
Slika 3.7 Upravljanje sa kompenzatorom (buffer)

Kompenzacija se često koristi u postupku projektovanja sistema. Kompenzator apsorbuje poremećaje u sistemu. Ovaj metod predstavlja pasivan način upravljanja sistemom (Slika 3.7). U fazi projektovanja sistema određuje se kompenzator koji deluje u sistemu pošto nastane poremećaj, ne utičući na faktore nastanka. Kompenzacija je prisutna i u situacijama kada nema poremećaja.



Slika 3.8 Upravljanje sa povratnom spregom(feedback)

Upravljanje sa povratnom spregom spada u reaktivne metode (Slika 3.8), u kojoj regulator meri koliko izlazna veličina odstupa od željene vrednosti i u skladu sa tim sledi reakcija kontrolora. Na taj način se utiče na procese u sistemu kako bi se smanjio uticaj poremećaja na izlaz.



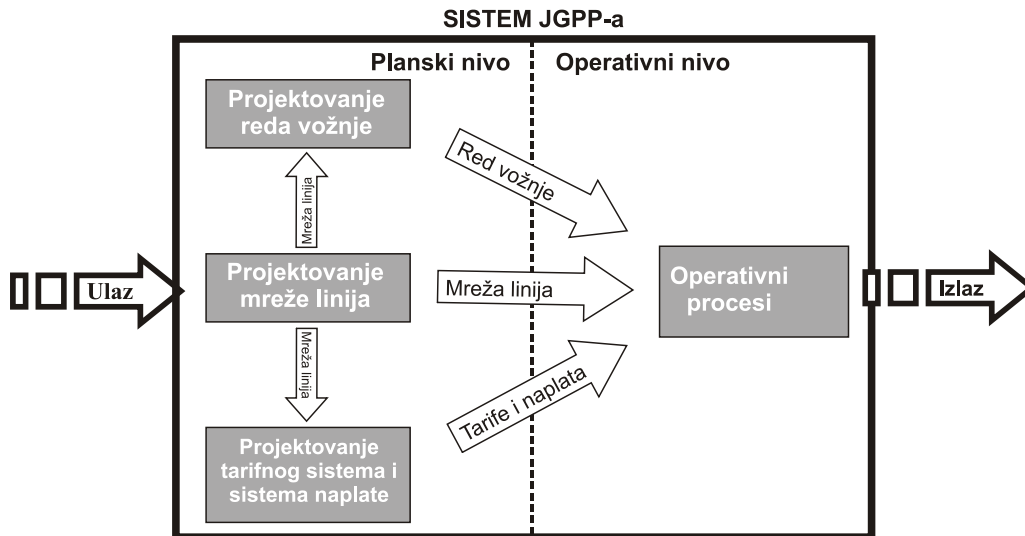
Slika 3.9 Upravljanje u otvorenoj sprezi (feedforward)

Upravljanje u otvorenoj sprezi obavlja se unapred, odnosno regulator predviđa poremećaj i zatim reaguje u skladu sa procenjenim uticajem poremećaja na izlaz (Slika 3.9).

Poznajući statičke i dinamičke osobine upravljanoj objekta moguće je izraditi njegov matematički model i naći takav algoritam upravljanja koji će obezbediti realizaciju zadatog algoritma funkcionisanja sa zadatim ulazima. Ipak, model približno predstavlja osobine fizičkog originala, a smetnje se mogu menjati stohastički, pa se i pri nađenom algoritmu upravljanja realno ponašanje sistema razlikuje od željenog, koje je određeno algoritmom funkcionisanja. Da bi se stvarno ponašanje približilo željenom, potrebno je algoritam upravljanja dovesti u vezu, ne samo sa karakteristikama sistema i algoritmom funkcionisanja nego i sa stvarnim funkcionisanjem sistema. U osnovi, pri stvaranju svakog sistema automatskog upravljanja potrebno je poštovati neke opšte fundamentalne metode upravljanja. One određuju način na koji se ostvaruje povezivanje algoritama funkcionisanja i upravljanja sa stvarnim funkcionisanjem ili uzrocima, koji izazivaju razlike između stvarnog i zadatog, ili željenog ponašanja sistema.

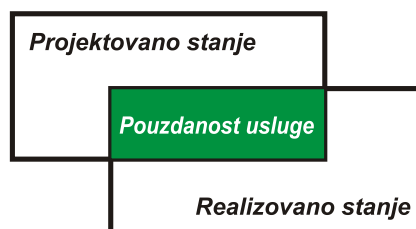
### 3.7.2 Upravljanje poremećajima u sistemu JGPP-a

Sistem javnog gradskog prevoza putnika, kao svaki dinamički sistem, ima definisan ulaz i izlaz. Ulaz predstavljaju transportni zahtevi, linije želja putnika, ulična mreža itd. Izlaz čini transportna usluga, koja je definisana u prostoru mrežom linija, a u vremenu redom vožnje. Posmatrajuću unutrašnji način funkcionisanja sistema JGPP-a izlaz iz jednog podprocesa predstavlja ulaz za drugi podproces u skladu sa datom šemom na Slici 3.10.



Slika 3.10 Šematski prikaz unutrašnje strukture sistema JGPP-a

Proizvodni proces javnog gradskog prevoza putnika sastoji iz dva dela (Slika 3.10), operativnog nivoa tj. nivoa stvarnih operacija i planskog nivoa, koji se sastoji od sledećih podprocesa projektovanja: mreže linija, reda vožnje, tarifnog sistema i sistema naplate. Planski nivo predstavlja ulaz za operativni nivo. Na operativnom nivou, stvarni proizvod obezbeđuje korisnicima kretanje u prostoru za određeni vremenski period. U praksi često se realizacija kretanja vozila duž linije ne podudara sa planiranim, odnosno javljaju se odstupanja u realizaciji projektovanog reda vožnje. U zavisnosti od veličine odstupanja dolazi do nepouzdanosti usluge (Slika 3.11). U sistemima javnog gradskog prevoza putnika odstupanje realizovanog intervala sleđenja vozila od projektovanog predstavlja glavni parametar nepouzdanosti usluge.



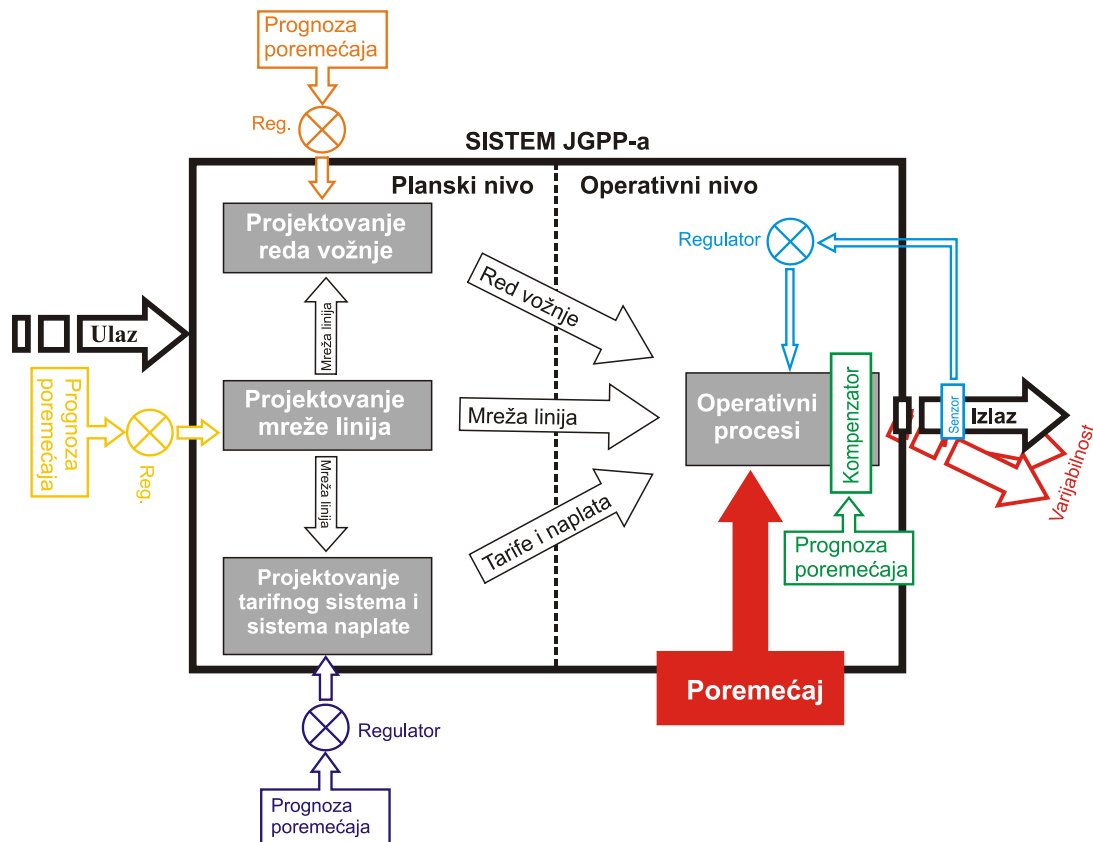
Slika 3.11 Pouzdanost usluge – odstupanje realizovanog od projektovanog stanja sistema

Postizanje ravnomernosti intervala sleđenja podrazumeva primenu različitih metoda upravljanja navedenim podprocesima u okviru sistema JGPP-a. Vrsta primenjene metode na nekom podprocesu zavisi od dinamičkih i statičkih osobina podprocesa kao i međusobnih veza između podprocesa.

Jedan od osnovnih uslova funkcionisanja sistema JGPP-a je da se izlaz iz podprocesa projektovanja mreže linija, reda vožnje, tarifnog sistema i sistema naplate ne menja u dužem vremenskom periodu. Izlazni rezultati navedenih podprocesa definišu se na taktičkom ili strateškom nivou, i period njihove konstantnosti meri se mesecima ili godinama. Poremećaj u intervalu sleđenja vozila meri se u minutima. Kada se uporedi vreme trajanja nastalog poremećaja intervala sleđenja vozila i vreme konstantnosti izlaza navedenih potprocesa

može se zaključiti da je nemoguće korišćenje metode upravljanja sa povratnom spregom u podprocesima projektovanja mreže linija, reda vožnje, tarifnog sistema i sistema naplate. Za podprocese projektovanja mreže linija, sistema naplate i tarifnog sistema moguće je koristiti metodu upravljanja u otvorenoj sprezi, dok je za podsistem projektovanja reda vožnje moguće koristiti metode upravljanja u otvorenoj sprezi i upravljanja sa kompenzatorom (Slika 3.12).

Za upravljanje podprocesima na operativnom nivou moguće je koristiti sve tri metode. Podproces i na operativnom nivou realizuju se u isto vreme kada se dešavaju i poremećaji intervala sleđenja vozila. Vremensko poklapanje pojedinih procesa na operativnom nivou i nastanka/širenja poremećaja intervala sleđenja vozila omogućava korišćenje metode upravljanja sa povratnom spregom (feedback). Ova metoda upravljanja sistemom JGPP-a podrazumeva kontrolu i upravljanje operativnim procesima na osnovu prikupljenih podataka u realnom vremenu (Slika 3.12). Da bi se obezbedile informacije u realnom vremenu, metode upravljanja sa povratnom spregom zahtevaju obavezno korišćenje sistema za automatsko praćenje vozila (AVL) i sistema za automatsko brojanje putnika (APC). Metode upravljanja sa povratnom spregom (feedback) mogu se zasnivati na izmeni režima kretanja vozila, režima zaustavljanja vozila na stajalištima ili režima izmene putnika. U podprocesima operativnog nivoa mogu se koristiti i druge opšte metode upravljanja, odnosno upravljanje sa kompenzatorom i upravljanje u otvorenoj sprezi (Tabela 3.3).



Slika 3.12 Šematski prikaz primene pojedinih metoda upravljanja poremećajem intervala sleđenja

Tabela 3.3 Mogućnost primene opštih metoda upravljanja u potprocesima JGPP-a

	Projektovanje			Operativni procesi
	Mreža linija	Red vožnje	Tarifni sistem i sis. naplate	
Kompenzator (buffer)	ne	da	ne	da
Povratna sprega (feedback)	ne	ne	ne	da
Otvorena sprega (feedforward)	da	da	da	da

Na osnovu prethodne analize može se zaključiti da se metode upravljanja u povratnoj sprezi koriste kao mera za smirivanje neravnomernosti intervala za slučaj kada se poremećaj već dogodio, tako da su one regulatori ravnomernosti. Metode zasnovane na upravljanju u otvorenoj sprezi ili sa kompenzatorom su preventivne mere i zahvaljujući njima stvara se i povećava otpornost sistema na nastanak i širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu JGPP-a.

Većina autora u dostupnoj literaturi koristi samo jednu metodu za povećanje stepena ravnomernosti intervala sleđenja vozila. Na osnovu prethodno iznetog može se zaključiti da bi se najbolji stepen ravnomernosti intervala sleđenja postizao kombinacijom dve ili više metoda. Primenjene metode moraju obuhvatiti i preventivno delovanje u vidu povećanja otpornosti sistema na poremećaj, ali i regulatore ravnomernosti intervala sleđenja vozila, kada nastane poremećaj.

### 3.7.3 Klasifikacija mera i strategija za povećanje ravnomernosti

U većem delu dostupne literature primenjene/razvijene metode za upravljanje poremećajima intervala sleđenja vozila nazivaju se zajedničkim imenom "**Strategije i mere za povećanje ravnomernosti**". Navedeni naziv će biti korišćen u daljem delu ovog rada.

Na osnovu sprovedene analize i prikupljenih podataka u okviru literature, u podpoglavlju Optimizacije i upravljanje ravnomernošću intervala sleđenja izvršena je klasifikacija primenjenih mera i strategija za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila.

Klasifikacija mera i strategija za upravljanje ravnomernošću intervala sleđenja vozila na linijama JGPP-a vrši se na osnovu:

- Nivoa organizovanja i upravljanja sistemom JGPP-a (planske, operativne),
- Nivoa potrebnih informacija (lokalne i sistemske, u realnom vremenu i unapred determinisane),
- Delovanja u odnosu na trenutak nastanka poremećaja (preventivne i represivne mere),
- Pozicije delovanja na liniji (na stajalištu, između stajališta i ostale),
- Cilja – uspostavljanje tačnosti ili ravnomernosti intervala sleđenja.



Najčešće primenjavana podela strategija je prema nivou organizovanja i upravljanja sistemom JGPP-a (Slika 3.13), prema kojoj se mere i strategije dele na planske i operative. Planske mere se primenjuju na taktičkom i strateškom nivou, a odnose se na optimizaciju: infrastrukturnih elemenata linija, statičkih i dinamičkih elemenata linija, tarifnog sistema, sistema naplate, dizajna vozila i dr. Operativne strategije se odnose na stvarne operacije na terenu koje kao rezultat daju transportnu uslugu, a prema poziciji delovanja dodatno se mogu podeliti na strategije: na stajalištu, između stajališta i ostale strategije.

<b>PLANSKI NIVO</b>	<b>Infrastrukturne mere</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sao. površine rezervisane za vozila JP (s. trake, ulice, prilazi raskrsnicama)</li> <li>- Dizajn stajališta</li> <li>- Prioritet na raskrsnicama</li> </ul>
	<b>Optimizacija statičkih elemenata</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Međustanična rastojanja</li> <li>- Dužina linije</li> <li>- Broj stajališta</li> </ul>
	<b>Optimizacija dinamičkih elemenata</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vreme poluobrtu</li> <li>- Vreme terminiranja</li> </ul>
<b>OPERATIVNI NIVO</b>	<b>Optimizacija dizajna vozila</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visina poda vozila u nivou stajališta</li> <li>- Broj i širina vrata</li> <li>- Raspored sedišta u vozilu</li> </ul>
	<b>Optimizacija tarifnog sistema i sistema naplate</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Broj tarifa</li> <li>- Struktura karata</li> <li>- Način naplate</li> <li>- Režim izmene putnika</li> </ul>
	<b>Strategije na stajalištu</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zadržavanje vozila:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Održanje ravnomernosti</li> <li>- Održanje tačnosti</li> </ul> </li> <li>- Ograničenje ulazaka putnika</li> <li>- Preskakanje stajališta</li> <li>- Okretanje vozila - skraćivanje linije</li> <li>- Vožnja bez putnika</li> <li>- Skraćeno vreme terminiranja</li> </ul>
	<b>Strategije između stajališta</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Preticanje vozila JP</li> <li>- Kontrola brzine kretanja vozila</li> <li>- Dinamički signali prioriteta na raskrsnicama</li> </ul>	
<b>Ostale strategije</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uključivanje dodatnog vozila</li> </ul>	

Slika 3.13 Klasiifikacija strategija i mera za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila

Razvoj oblasti upravljanja i kontrole ravnomernosti intervala sleđenja pratio je nagli razvoj inteligentnih transportnih sistema (ITS). Tehnologije automatskog praćenja vozila (AVL - automatic vehicle location sistem), automatskog brojanja putnika (APC – automatic passenger counter) i bežičnog prenosa podataka (WiFi, GPRS, WCDMA) su osnova informacionog sistema JGPP-a u realnom vremenu. Poznavanje stanja sistema JGPP-a u svakom trenutku podstakao je nastanak i razvoj nove grupe strategija na operativnom nivou, pod nazivom strategije za upravljanje ravnomernošću intervala sleđenja vozila u realnom vremenu. U početku razvoja, ove strategije su imale samo lokalni karakter, optimizovale su kretanje jednog vozila na osnovu podatka o poziciji vozila koje mu prethodi. Vremenom su istraživanja preusmerena na jednovremenu optimizaciju celog sistema. Sistemske strategije omogućavaju naprednije korišćenje strategija za upravljanje poremećajem i prevazilaze ograničenja lokalnih strategija. Najviše razvijane strategije u realnom vremenu su: zadržavanje vozila na stajalištima, ograničen ulazak putnika, preskakanje stajališta, ranije okretanje vozila-prekid poluobrta, uključivanje dodatnog vozila.

U odnosu na trenutak nastanka primarnog poremećaja intervala sleđenja, strategije se dele na preventivne i represivne. Preventivne mere i strategije povećavaju otpornost sistema na nastanak i širenje poremećaja intervala sleđenja vozila. Represivne mere i strategije su regulatori ravnomernosti i one smiruju primarni poremećaj i sprečavaju nastanak i dalje širenje sekundarnog poremećaja intervala sleđenja vozila.

## **4 RAZVOJ MODELA ŠIRENJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA U SISTEMU JGPP-A**

Veliki broj nekontrolisanih spoljašnjih faktora, komplikovana struktura i način funkcionisanja JGPP-a čine sistem podložnim učestalim nastancima primarnih poremećaja intervala sleđenja vozila. Ovo za posledicu ima funkcionisanje sistema JGPP-a u uslovima postojanja većeg broja primarnih poremećaja intervala sleđenja. Primarni poremećaji intervala sleđenja imaju tendenciju da se šire u sistemu i međusobno interaktuju.

U ovom poglavlju, predmet modeliranja su procesi širenja, prenošenja i kumuliranja jednog primarnog poremećaja intervala sleđenja, kao i slaganje više poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu JGPP-a. Svrha modeliranja nije identifikacija uzroka nastanka poremećaja intervala sleđenja vozila, nego analize uticaja parametara koji izazivaju njegovo širenje. U postupku modeliranja uzeti su u obzir svi procesi koji se realizuju tokom kretanja vozila u jednom poluobrtu, pri čemu su korišćeni samo oni procesi koji imaju uticaj na:

- kumuliranje poremećaja intervala sleđenja vozila,
- prenošenje poremećaja intervala na naredne polaske drugih vozila koji slede po redu vožnje,
- slaganje većeg broja poremećaja intervala sleđenja vozila.

### **4.1 IDENTIFIKACIJA UTICAJNIH PARAMETARA**

U ovom podpoglavlju identifikovani su parametri koji utiču na kumuliranje poremećaja intervala sleđenja vozila i prenošenje poremećaja intervala na naredne polaske po redu vožnje. Svi parametri relevantni za razvoj modela sagledani su kroz vremenske komponente kretanja vozila na liniji u toku jednog poluobrtu, a to su:

- vreme zadržavanje vozila na stajalištu,
- vreme kretanje vozila između stajališta, i
- vreme zadržavanja vozila na terminusu.

#### 4.1.1 Vreme zadržavanja vozila na stajalištu

Osnovni procesi koji su značajni za formiranje ovog modela odvijaju se tokom mirovanja vozila na stajalištu, a to su: otvaranje vrata, izmena putnika i zatvaranje vrata. Vreme zadržavanja vozila na stajalištu ( $t_s$ ) predstavljeno je sledećom formulom:

$$t_s = t_{ov} + t_{izm} + t_{zv}, [min] \quad (4.1)$$

gde su:

$t_s$  – Vreme zadržavanja vozila na stajalištu,

$t_{ov}$  – Vreme potrebno za otvaranje vrata,

$t_{izm}$  – Vreme izmene putnika,

$t_{zv}$  – Vreme potrebno za zatvaranje vrata.

Vreme potrebno za otvaranje ( $t_{ov}$ ) i zatvaranje vrata ( $t_{zv}$ ) zavisi od tehničko – mehaničkih svojstava vozila i može se posmatrati kao konstanta. Kada se na stajalištu vrši izmena putnika suma vremena otvaranja ( $t_{ov}$ ) i zatvaranja vrata ( $t_{zv}$ ) daleko je manja od vremena zadržavanja vozila na stajalištu  $t_{ov} + t_{zv} \ll t_s$ . Vreme potrebno za otvaranje i zatvaranje vrata ne utiče na varijacije vremena zadržavanja vozila na stajalištu i u ovom modelu će biti zanemareno.

Izmena putnika podrazumeva procese izlazaka i ulazaka putnika u vozilo na stajalištima duž linije. Ukoliko se naplata ili čekiranje putnika vrši prilikom ulaska u vozilo, intenzitet izlaska putnika je daleko veći od intenziteta ulaska putnika. U tom slučaju vreme izmene ( $t_{izm}$ ) determinisano je vremenom potrebnim za ulazak putnika u vozilo (Daganzo, 2009; Bellei i Gkoumas, 2010; Vučić, 2005). Vreme izmene putnika zavisi od broja putnika koji ulaze u vozilo ( $U$ ) i prosečnog intenziteta ulazaka putnika ( $\mu$ ).

$$t_{izm} = \frac{U}{\mu}, [min] \quad (4.2)$$

Kod intervala sleđenja vozila manjih od 15 minuta nakupljanje putnika na stajalištima vrši se ravnomerno u vremenu i nezavisno od reda vožnje (Simeunović, 2001; Vučić, 2005). Broj putnika koji će ući u vozilo na nekom stajalištu isključivo zavisi od intenziteta nakupljanja putnika ( $\lambda$ ) i intervala sleđenja vozila ( $i$ ).

$$U = \lambda \cdot i, [putnika] \quad (4.3)$$

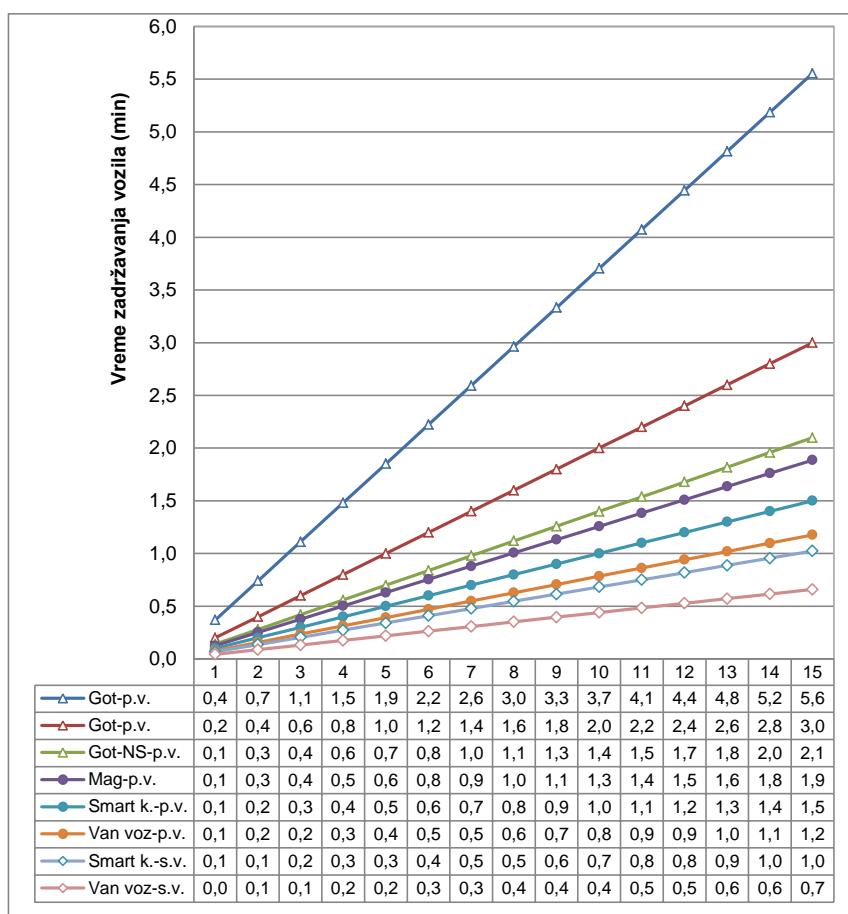
Može se zaključiti da je vreme zadržavanja vozila na stajalištu ( $t_s$ ) u funkciji od veličine intervala sleđenja vozila ( $i$ ), intenziteta nakupljanja putnika ( $\lambda$ ) i prosečnog intenziteta ulaska putnika u vozilo ( $\mu$ ).

$$t_s = t_{izm} = \frac{\lambda \cdot i}{\mu}, \text{ [min]} \quad (4.4)$$

Na osnovu jednačine (4.4) uspostavljena je funkcionalna zavisnost između vremena zadržavanja vozila na stajalištu i navedenih parametara. Veza intenziteta nakupljanja putnika ( $\lambda$ ) i intervala sleđenja vozila ( $i$ ) sa vremenom zadržavanja vozila na stajalištu ( $t_s$ ) linearnog je karaktera. Recipročna funkcija opisuje vezu između intenziteta ulazaka putnika u vozilo ( $\mu$ ) i vremena zadržavanja vozila na stajalištu ( $t_s$ ).

#### Vreme zadržavanja u funkciji intervala sleđenja vozila $t_s=f(i)$

Funkcionalna zavisnost vremena zadržavanja vozila na stajalištu od veličine intervala sleđenja prikazana je kroz variranje veličine intervala sleđenja od 1 do 15 minuta (Slika 4.1). Pri tome, intenzitet ulazaka putnika definisan je za različite režime ulaska putnika u vozilo i sisteme naplate (Tabela 4.1). Intenzitet nakupljanja putnika uzet je kao konstanta.

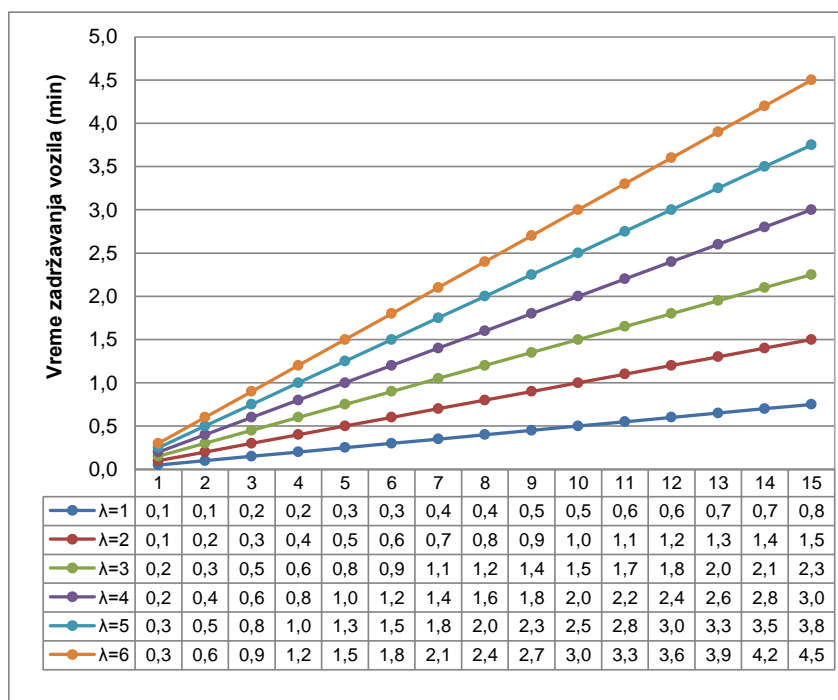


Slika 4.1 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intervala sleđenja vozila za različite režime ulaska putnika u vozilo i sistema naplate

Tabela 4.1 Vrednosti intenziteta ulaska putnika u vozilo u zavisnosti od režima izmene i sistema naplate (Tirachini i Hensher, 2011; Tirachini, 2013)

Sistem naplate	Režim ulaska	Intenzitet ulaska (putnik/min)
Gotovina (Sidnej)	Prednja vrata	5,4
Gotovina (Južna Kalifornija)	Prednja vrata	10,0
Magnetna kartica	Prednja vrata	15,9
Bezkontaktna smart kartica	Prednja vrata	20,0
Plaćanje i verifikacija van voz.	Prednja vrata	25,5
Bezkontaktna smart kartica	Sva vrata	29,3
Plaćanje i verifikacija van voz.	Sva vrata	45,5
Gotovina (Novi Sad)	Prednja vrata	14,3

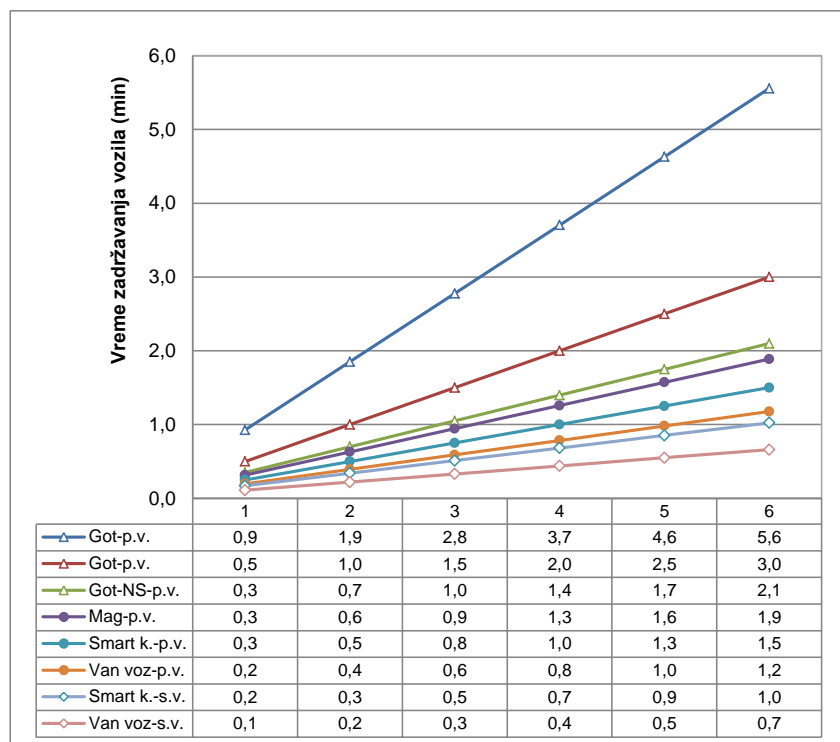
Na sledećem grafiku je prikazana funkcionalna zavisnost vremena zadržavanja vozila na stajalištu od veličine intervala sleđenja, za različite intenzitete nakupljanja putnika i uz konstantni intenzitet ulaska putnika u vozilo.



Slika 4.2 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intervala sleđenja vozila za različite intenzitete nakupljanja putnika

#### Vreme zadržavanja u funkciji intenziteta nakupljanja putnika $t_s=f(\lambda)$

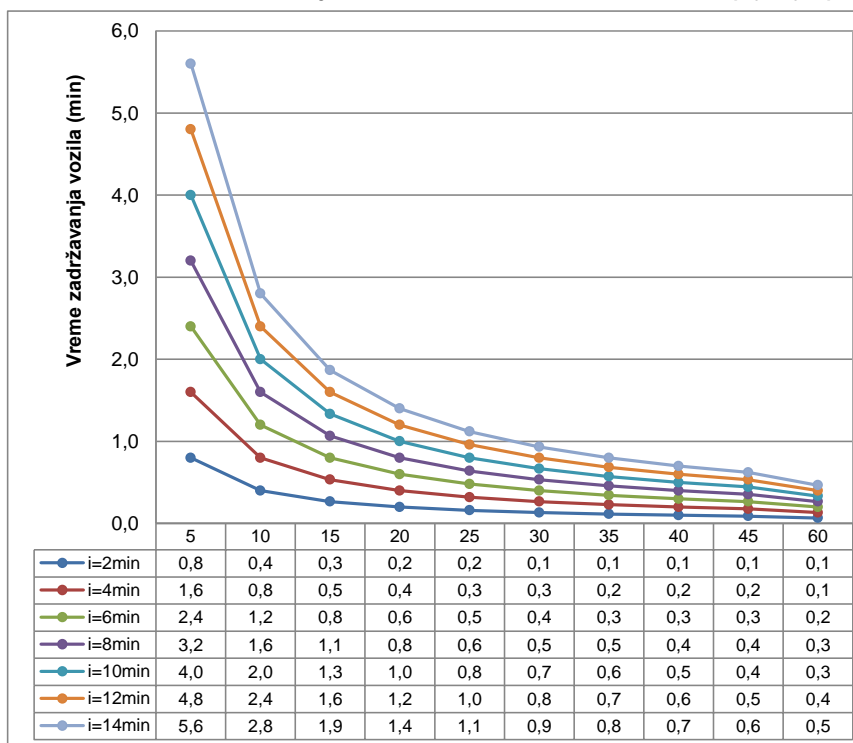
Na sledećem grafiku prikazana je funkcionalna zavisnost vremena zadržavanja vozila na stajalištu u odnosu na intenzitet nakupljanja putnika, za različite režime ulaska putnika u vozilo i sisteme naplate (Tabela 4.1). Interval sleđenja uzet je kao konstanta, a variranje intenziteta nakupljanja putnika je izvršeno u rasponu od 1 do 6 putnika po minuti.



Slika 4.3 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intenziteta nakupljanja putnika za različite režime ulaska putnika u vozilo i sistema naplate

Vreme zadržavanja u funkciji intenziteta ulaska putnika u vozilo  $t_s=f(\mu)$

Recipročnom funkcijom predstavljena je zavisnost vremena zadržavanja vozila na stajalištu od intenziteta ulaska putnika u vozilo. Na sledećem grafiku je dat primer navedene zavisnosti za različite intervale sleđenja uz konstantan intenzitet nakupljanja putnika.



Slika 4.4 Promena vremena zadržavanja vozila na stajalištu u funkciji intenziteta ulaska putnika u vozilo za različite intervale sleđenja vozila

#### **4.1.2 Vreme kretanja vozila između stajališta**

Stepen interakcije podsistema JGPP-a sa ostalim vidovima površinskog saobraćaja utiče na vreme kretanja vozila između stajališta. Stepenn nezavisnosti trase podsistema JGPP-a (row A, B ili C) predstavlja jedan od osnovnih faktora varijacije vremena kretanja vozila između stajališta. Kod sistema javnog gradskog prevoza koji podrazumevaju potpuno nezavisnu trasu (row A), varijabilnost vremena kretanja vozila između stajališta je zanemarljiva (Vukan, 2007). Kod zavisnih i delimično zavisnih trasa (row B i row C) tokovi mešovitog saobraćaja imaju neosporan uticaj na kretanje vozila javnog gradskog prevoza (Simeunović i ostali, 2016). Tokovi mešovitog saobraćaja stvaraju primarne poremećaje intervala sleđenja vozila, ali ne utiču na njegovo širenje, kumuliranje ili prenošenje (ne utiču na sekundarne poremećaje). U skladu sa prethodno navedenim, a sa ciljem da se model pojednostavi, vreme kretanja vozila između stajališta posmatraće se kao konstanta.

#### **4.1.3 Vreme zadržavanja vozila na terminusu**

Tokom procesa terminiranja nema putnika u vozilu. Vreme terminiranja ne utiče na prevoznu brzinu i kvalitet usluge. Vozilo se na terminusu može zadržati u skladu sa potrebama reda vožnje. Procesi koji se realizuju u okviru vremena terminiranja su:

- Dolazak vozila (iz garaže ili sa poluobrta),
- Izlazak putnika (ukoliko je terminus i stajalište za putnike),
- Provera vozila i kraće opravke vozila po potrebi,
- Okretanje vozila,
- Pauza vozača (5 min prema čl. 243 ZoBS-a),
- Promena vozača (neobavezno),
- Ulazak putnika (ukoliko je terminus i stajalište za putnike),
- Polazak vozila.

Projektovano vreme zadržavanja vozila na terminusu je konstantna veličina. U zavisnosti od autora, vreme terminiranja se utvrđuje na različite načine, a minimalno vreme terminiranja je definisano zakonom. Prema čl. 243 Zakona o bezbednosti saobraćaja na putevima, vozač autobusa, trolejbusa i tramvaja, u JGPP-u, sme upravljati vozilom najduže osam sati, uz uslov da na polaznim stajalištima ima prekid vožnje od najmanje 5 minuta.

Tokom procesa terminiranja usled delovanja određenih faktora (poglavlje 3.4.1) nastaju varijacije u vremenu zadržavanja vozila na terminusu. Odstupanja vremena zadržavanja vozila na terminusu od projektovanog, kao i kašnjenja vozila iz prethodnog obrta, mogu prouzrokovati kašnjenja u polasku vozila sa terminusa. U zavisnosti od prirode poremećaja intervala sleđenja (realizovani interval sleđenja je veći ili manji u odnosu na projektovani) postoje dva slučaja za kompenzovanje nastalih poremećaja intervala sleđenja iz prethodnog poluobrta.



I slučaj – realizovani interval sleđenja vozila je veći u odnosu na projektovani

Vremenski zaostatak vozila po dolasku na terminus može da se ublaži ili totalno otkloni u slučaju da je moguće:

- ubrzati predviđene operacije na terminusu,
- preskočiti pojedine operacije na terminusu,
- u redu vožnje projektovati duža vremena terminiranja za potrebe otklanjanja poremećaja (zaštitno vreme).

Za slučaj kada u okviru vremena terminiranja nije moguće totalno apsorbovati vremenski zaostatak vozila, poremećaj intervala sleđenja se ublažava i jednim delom prenosi na naredni polazak istog vozila. Vreme kašnjenja vozila u narednom polasku dobija se kao:

$$\tau_1 = \tau_c - \tau_{abs}, \text{ [min]} \quad (4.5)$$

gde je:

$\tau_1$  – vreme kašnjenja vozila na prvom stajalištu drugog polaska,

$\tau_c$  – vreme kašnjenja vozila na poslednjem stajalištu prvog polaska,

$\tau_{abs}$  – maksimalni period vremena koji je moguće izdvojiti za apsorbovanje poremećaja iz vremena terminiranja.

II slučaj – realizovani interval sleđenja vozila je manji u odnosu na projektovani

Za slučaj da je realizovani interval sleđenja vozila manji u odnosu na projektovani, moguće je zadržavati vozilo po stajalištima duž linije kako bi se poremećaj smanjio/otklonio. Zadržavanje vozila po stajalištima duž linije produžava vreme vožnje putnika. Bolje rešenje je dodatno zadržavanje vozila na terminusu, pri čemu se poremećaj intervala sleđenja vozila otklanja bez negativnih efekata na prevoznju brzinu.

Primarni poremećaji intervala sleđenja vozila nastaju na terminusu usled objektivnih faktora, ali proces terminiranja ne utiče na širenje i kumuliranje poremećaja intervala sleđenja vozila.

Pravilnim dimenzionisanjem vremena terminiranja (dodavanjem zaštitnog vremena) u postupku izrade reda vožnje, moguće je kompenzovati nastale neravnomernosti intervala sleđenja. Modelom neće biti obuhvaćeno vreme terminiranja, jer ono kada je pravilno dimenzionisano ne utiče na širenje i kumuliranje poremećaja intervala sleđenja vozila duž linije.

## 4.2 MODEL ŠIRENJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA

U modelu, širenje poremećaja intervala sleđenja vozila predstavljeno je po stajalištima duž linije i po polascima u redu vožnje. Pozicija poremećaja intervala sleđenja vozila (stajalište/polazak) relativna je i posmatra se u odnosu na repenu tačku. Reperna tačka je

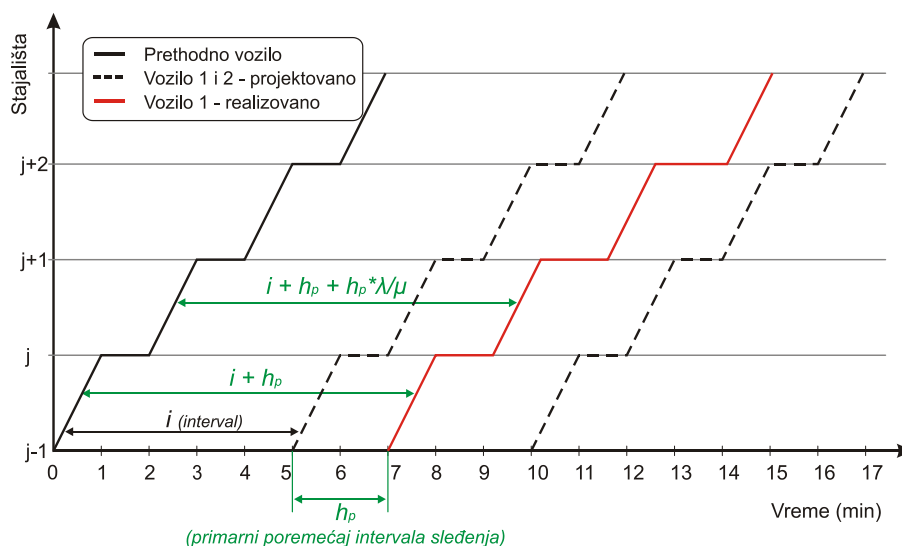
definisana polaskom vozila i stajalištem na kojem je registrovan primarni poremećaj intervala sleđenja.

Formiranje determinističkog modela urađeno je uz sledeće pretpostavke:

- Vremena kretanja vozila između stajališta su uniformna,
- Vremena potrebna za otvaranje i zatvaranje vrata su konstantna i zanemarljivo mala u odnosu na zadržavanje vozila na stajalištu,
- Izmena putnika, ulazak i izlazak putnika na stajalištu se odvija jednovremeno,
- Broj putnika koji ulaze u vozilo na stajalištu nije ograničen,
- Intervali sleđenja vozila su manji od 15 minuta,
- Varijabilnost nakupljanja putnika po stajalištima duž linije je konstanta,
- Vozila iste linije se ne pretiču.

#### 4.2.1 Širenje poremećaja po stajalištima duž linije

U idealnim uslovima sistem javnog gradskog prevoza putnika funkcioniše sa ravnomernim intervalom sleđenja. Vozilo 1 sledi svog prethodnika ravnomerno duž linije sa projektovanim intervalom ( $i$ ). Kada usled delovanja različitih faktora vozilo 1 na stajalište  $j$  zakasni za period  $h_p$  (primarni poremećaj) produžava se i vreme zadržavanja vozila na stajalištu  $j$  (Slika 4.5). Produženo zadržavanje je posledica dužeg vremena izmene u odnosu na projektovano, zbog većeg broja putnika koji se nakupio tokom vremena  $h_p$ . Dolaskom na naredno stajalište  $j+1$  vozilo 1 ne kasni samo za vremenski period  $h_p$ , već se kašnjenje povećava u zavisnosti od intenziteta nakupljanja putnika ( $\lambda$ ) i intenziteta ulaska putnika u vozilo ( $\mu$ ). Na prethodno opisan način se širi kašnjenje vozila 1 duž linije.



Slika 4.5 Prostor – vreme dijagram širenja poremećaja intervala sleđenja vozila 1

Primarni poremećaj intervala ( $h_p$ ) nastao na stajalištu 1 predstavlja razliku između realizovanog i projektovanog intervala sleđenja, a na osnovu definisanih pretpostavki može se matematički opisati (jed. (4.6)).

$$h_p = h_1 = i_r - i, \quad [min] \quad (4.6)$$

gde je:

- $h_p$  – primarni poremećaj intervala sleđenja vozila,
- $h_1$  – poremećaj intervala sleđenja vozila zabeležen na prvom stajalištu,
- $i$  – projektovani interval sleđenja vozila,
- $i_r$  – realizovani interval sleđenja vozila.

Poremećaj se prenosi na drugo stajalište prema jednačini (4.7).

$$h_2 = h_1 + h_1 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right), \quad [min] \quad (4.7)$$

gde je:

- $h_2$  – poremećaj intervala sleđenja vozila na drugom stajalištu,
- $\lambda$  – prosečan intenzitet nakupljanja putnika duž linije,
- $\mu$  – prosečan intenzitet ulaska putnika u vozilo.

Istim zakonom se poremećaj intervala sleđenja vozila prenosi sa drugog na treće stajalište, jednačina (4.8).

$$h_3 = h_2 + h_2 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right), \quad [min] \quad (4.8)$$

I tako do  $s$  stajališta na liniji, jednačina (4.9).

$$h_s = h_{s-1} + h_{s-1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right), \quad [min] \quad (4.9)$$

Za slučaj poznavanja veličine i lokacije nastalog primarnog poremećaja intervala sleđenja, prosečnog intenziteta nakupljanja putnika na stajalištima i intenzitet ulazaka putnika, moguće je unapred definisati širenje poremećaja intervala sleđenja po stajalištima duž linije, jednačina (4.10).

$$h_s = h_p \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{s-1}, \quad [min] \quad (4.10)$$

gde je:

- $h_s$  – poremećaj intervala sleđenja na  $s$ -tom stajalištu,
- $s$  – broj stajališta po redu u odnosu na lokaciju stajališta primarnog poremećaja.

#### 4.2.2 Širenje poremećaja po polascima u redu vožnje i po stajalištima duž linije

Nastala neravnomernost intervala sleđenja prenosi se i na naredne polaske u redu vožnje. Prenošnje poremećaja na naredno vozilo je posledica ostvarenog vremena za nakupljanje putnika i potrebnog vremena za ulazak tih putnika, posmatrano po stajalištima.

Vozilo 2 se kreće po redu vožnje (Slika 4.6), ali budući da vozilo 1 prilikom dolaska na stajalište  $j$  kasni za  $h_p$ , interval sleđenja vozila 2 se smanjuje za  $h_p$  i iznosi  $i - h_p$ . Smanjeni interval sleđenja vozila 2 na stajalištu  $j$  znači smanjeni broj nakupljenih putnika i kraće

zadržavanje na stajalištu. Na stajalištu  $j+1$  interval sleđenja vozila 2 se dodatno smanjio i ima tendenciju ka daljem smanjivanju.

Na smanjivanje intervala sleđenja vozila 2 utiču dva procesa. Prvi proces predstavlja kumuliranje kašnjenja vozila 1 duž linije, a drugi proces je kumuliranje bržeg kretanja vozila 2 duž linije (Slika 4.6).

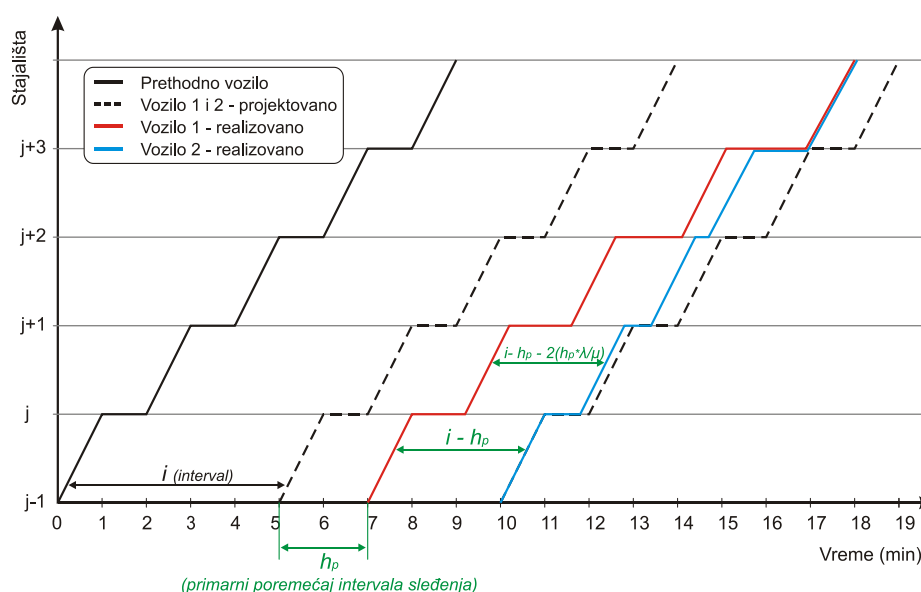
Analogno opisanim postupkom, poremećaj intervala sleđenja se širi i na naredna vozila u redu vožnje (vozilo 3 vozilo 4 itd.). Krajnji slučaj navedenih neravnomernosti intervala sleđenja je grupisanje vozila na liniji.

Prvi poremećaj u intervalu sleđenja vozila 2 se realizuje na stajalištu 2 i definisan je jednačinom (4.11).

$$h_{2,2} = -h_{1,1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right), [min] \quad (4.11)$$

Opšta veza širenja poremećaja intervala sleđenja po stajalištima duž linije za vozilo 2 ima sledeći oblik, jednačina (4.12).

$$h_{2,s} = h_{2,s-1} + h_{2,s-1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) - h_{1,s-1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right), [min] \quad (4.12)$$



Slika 4.6 Prostor – vreme dijagram širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na naredni polazak

Širenje poremećaja za vozilo 2 definisano je veličinom  $i$  i lokacijom nastalog poremećaja, prosečnim intenzitetom nakupljanja putnika na stajalištima i intenzitetom ulaska putnika u vozilo. Kada se za svako stajalište duž linije, veličina poremećaja intervala sleđenja vozila 2 ( $h_{2,s}$ ) izrazi preko primarnog poremećaja (jednačina (4.12)), kao i jednačine (4.10) za kretanje vozila 1 dobija se jednačina širenja intervala sleđenja po stajalištima za vozilo 2, jednačina (4.13).

$$h_{2,s} = -h_p (s-1) \frac{\lambda}{\mu} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^{s-2}, \quad [min] \quad (4.13)$$

Posmatrano u odnosu na lokaciju primarnog poremećaja, a analogno prethodno opisanom postupku za vozilo 2, dobija se jednačina širenja poremećaja intervala sleđenja vozila 3, jednačina (4.14).

$$h_{3,s} = h_p \frac{(s-1)(s-2)}{2} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^{s-3}, \quad [min] \quad (4.14)$$

Na osnovu jedanačine (4.10), jedanačine (4.12), jedanačine (4.13) i jedanačine (4.14) dobija se opšti model širenja poremećaja intervala sleđenja za naredne polaske po redu vožnje, jednačina (4.15).

$$h_{k,s} = h_p \frac{(s-1)!}{(k-1)!(s-k)!} \left(-\frac{\lambda}{\mu}\right)^{k-1} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^{s-k}, \quad [min] \quad (4.15)$$

gde su:

- $h_{k,s}$  – poremećaj intervala sleđenja  $k$ -tog vozila na  $s$ -tog stajališta,
- $s$  – broj stajališta po redu u odnosu na lokaciju stajališta primarnog poremećaja,
- $k$  – broj vozila po redu vožnje u odnosu na vozilo sa primarnim poremećajem,
- $\mu$  – prosečan intenzitet ulaska putnika u vozilo,
- $\lambda$  – prosečan intenzitet nakupljanja putnika,
- $h_p$  – primarni poremećaj intervala sleđenja.

#### 4.2.3 Složeno delovanje većeg broja poremećaja intervala sleđenja u sistemu

Sistem JGPP-a izložen je uticaju velikog broja faktora koji se razlikuju po intenzitetu, mestu delovanja i izvoru nastanka. Definisane širenje samo jednog primarnog poremećaja intervala sleđenja ne daje potpunu sliku kretanja vozila u uslovima narušene ravnomernosti.

U skladu sa prethodno definisanim postupkom širenja jednog primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu JGPP-a, formiran je deterministički model kojim se kvantifikuje uticaj većeg broja primarnih poremećaja intervala sleđenja na ravnomernost kretanja vozila u željenom polasku. Model slaganja većeg broja poremećaja intervala sleđenja razvija se postupno od najjednostavnijeg slučaja.

Definisane širenje većeg broja primarnih poremećaja intervala sleđenja na liniji JGPP-a predstavlja složen problem. Složenost problema proističe od:

- različitih lokacija primarnih poremećaja intervala sleđenja vozila,
- različitih intenziteta primarnih poremećaja,
- različitog uticaja primarnog poremećaja na interval sleđenja (smanjuje ili povećava postojeći interval).

Sa ciljem dobijanja matematički jednostavnijeg izraza, kod razvoja modela širenja jednog poremećaja za referentnu tačku usvojeno je stajalište na kojem je registrovan prvi primarni poremećaj intervala sleđenja vozila, dok će kod modela sa većim brojem primarnih poremećaja referentna tačka biti postavljena na početak linije, odnosno na prvo stajalište na liniji.

U modelu pozicija poremećaja intervala sleđenja vozila (stajalište/polazak) relativna je i posmatra se u odnosu na repenu tačku. Reperna tačka je definisana prvim stajalištem na liniji u posmatranom smeru i polaskom vozila na kojem je registrovan prvi primarni poremećaj intervala sleđenja vozila. Pomeranje referentne tačke na prvo stajalište na liniji zahteva da se parametar „s“ (broj stajališta po redu u odnosu na lokaciju stajališta primarnog poremećaja), zameni parametrima „g“ i „n“ prema jednačini (4.16) .

$$s = g - n + 1, \quad (4.16)$$

gde je:

- g – broj stajališta po redu u odnosu na prvo stajalište na liniji,
- n – broj stajališta po redu od prvog stajališta do stajališta primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila.

Kada se u jednačini (4.10) parametar „s“ zameni jednačinom (4.16), dobija se jednačina (4.17), kojom se definiše širenje jednog poremećaja intervala sleđenja vozila u odnosu na prvo stajalište na liniji.

$$h_{g,n} = h_{p,n} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g-n}, \quad [\text{min}] \quad (4.17)$$

gde je:

- $h_{g,n}$  – sekundarni poremećaj intervala sleđenja na stajalištu g
- $h_{p,n}$  – primarni poremećaj intervala sleđenja na stajalištu n
- g – broj stajališta po redu u odnosu na prvo stajalište na liniji,
- n – broj stajališta po redu od prvog stajališta do stajališta primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila.

#### Više primarnih poremećaja nastalih na jednom polasku

Najjednostavniji primer slaganja višestrukih poremećaja je slaganje dva poremećaja nastalih na različitim lokacijama u okviru jednog polaska. Ako prvi primarni poremećaj nastane na stajalištu „u“, a drugi na nekom od narednih stajališta (npr. stajalištu „v“, pri čemu

je  $u < v$ ), onda se stanje ravnomernosti intervala sleđenja po stajalištima duž linije definiše jednačinama (4.18 – 4.27).

$$h_1 = 0, \quad (4.18)$$

$$h_2 = 0, \quad (4.19)$$

...

$$h_u = h_{p,u} \quad (4.20)$$

$$h_{u+1} = h_u + h_u \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.21)$$

$$h_{u+2} = h_{u+1} + h_{u+1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.22)$$

...

$$h_{v-1} = h_{p,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v-1-u} \quad (4.23)$$

$$h_v = h_{p,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v-u} + h_{p,v} \quad (4.24)$$

Od početnog stajališta do stajališta „u“ vozilo se kreće ravnomerno bez poremećaja intervala sleđenja (jednačine 4.18 – 4.19). Nakon stajališta „u“ na kretanje vozila utiče prvi primarni poremećaj, koji se širi po stajalištima duž linije (jednačine 4.20 – 4.23).

Definisanje širenja poremećaja intervala sleđenja nakon stajališta „v“ predstavlja problem, jer se složen sekundarni poremećaj nastao slaganjem dva prosta poremećaja ne širi u sistemu kao jedan jedinstven poremećaj. Složene veze između broja nakupljenih putnika po stajalištima i vremena kretanja vozila duž linije utiču da poremećaji intervala sleđenja nastali na različitim lokacijama imaju različite intenzitete širenja po stajalištima duž linije.

$$h_{v+1} = h_{p,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v-u+1} + h_{p,v} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right), \quad (4.25)$$

$$h_{v+2} = h_{p,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v-u+2} + h_{p,v} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 \quad (4.26)$$

Širenje složenog sekundarnog poremećaja nakon stajališta „v“ definiše se isključivo kao suma širenja njegovih prostih komponenti (jednačina 4.25 – 4.26). U uslovima postojanja većeg broja primarnih poremećaja, stanje poremećaja intervala sleđenja po stajalištima duž linije na posmatranom polasku definiše se jednačinom (4.27).

$$h_g = \sum_{j=1}^m h_{p,n_j} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g-n_j}, \quad [\text{min}] \quad (4.27)$$

gde je:

$h_g$  – sekundarni poremećaj intervala sleđenja na stajalištu g,

- $h_{p,n}$  – primarni poremećaj intervala sleđenja na stajalištu  $n$ ,  
 $g$  – broj stajališta po redu u odnosu na prvo stajalište na liniji,  
 $n$  – broj stajališta po redu od prvog stajališta do stajališta primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila,  
 $m$  – ukupan broj poremećaja na posmatranom polasku,  
 $j$  – redni broj poremećaja.

Definisanje širenja složenog sekundarnog poremećaja na naredne polaske (jednačina (4.28)) vrši se analogno širenju jednog prostog sekundarnog poremećaja (jednačina (4.15)), a u skladu sa prethodno utvrđenim da se širenje složenog sekundarnog poremećaja može definisati isključivo kao suma širenja njegovih prostih komponenti.

$$h_{k,g} = \sum_{j=1}^m h_{p,n_j} \frac{(g - n_j)!}{(k - 1)! (g - n_j - k + 1)!} \left( -\frac{\lambda}{\mu} \right)^{k-1} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g - n_j - k + 1}, \quad [\text{min}] \quad (4.28)$$

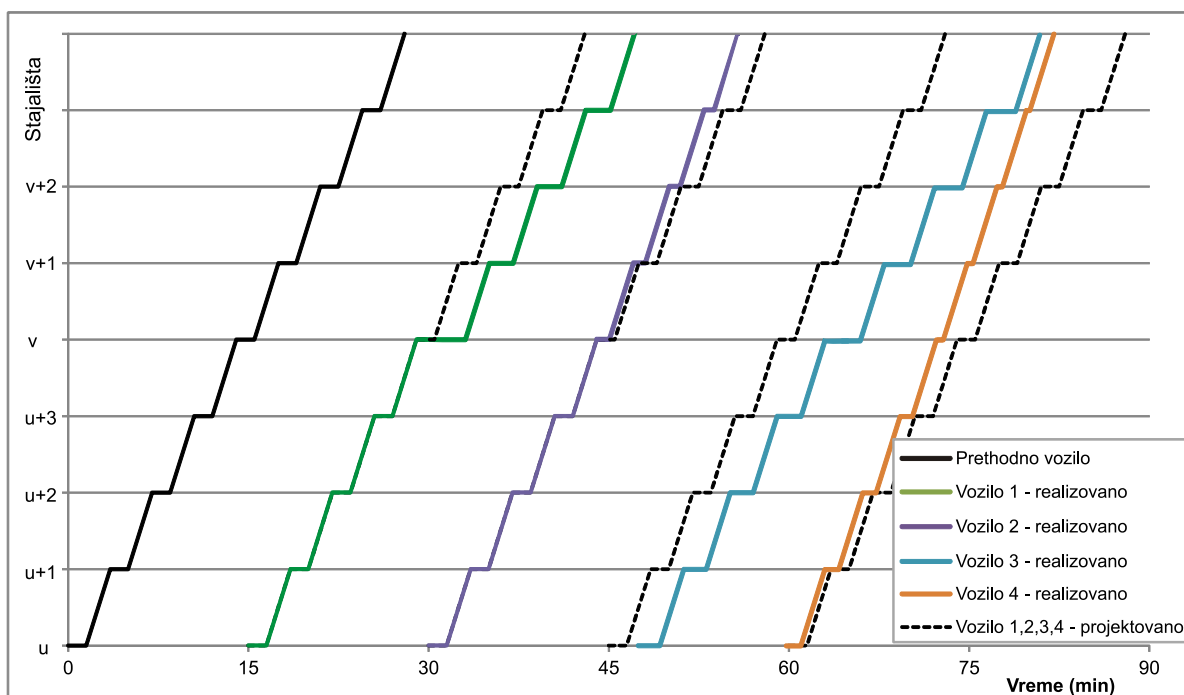
#### Više primarnih poremećaja nastalih na različitim polascima

U ovom primeru predstavljeno je širenje i slaganje poremećaja intervala sleđenja u sistemu, za slučaj pojave dva primarna poremećaja intervala sleđenja vozila na različitim polascima i na različitim stajalištima duž linije (u daljem tekstu primarni poremećaji  $\gamma$  i  $\delta$ ). Primarni poremećaj  $\gamma$  nastao je usled delovanja faktora na vremenske komponente kretanja vozila 1 na stajalištu „v“, dok je primarni poremećaj  $\delta$  nastao kod vozila 3 na stajalištu „u“ (Slika 4.7), pri čemu je  $u < v$ .

Na kretanje vozila 1 utiče samo primarni poremećaj  $\gamma$ , a širenje poremećaja intervala sleđenja definisano je jednačinom (4.10). Takođe, na kretanje vozila 2 utiče samo primarni poremećaj ( $\gamma$ ), a širenje poremećaja intervala sleđenja kod vozila 2 definisano je jednačinom (4.13).

Na kretanje vozila 3 utiče složen sekundarni poremećaj koji je formiran slaganjam poremećaja  $\gamma$  i  $\delta$ . Primarni poremećaj  $\delta$  ima direktan uticaj na kretanje vozila 3, dok primarni poremećaj  $\gamma$  ima indirektan uticaj. Širenje poremećaja intervala sleđenja kod vozila 3 je složeno i analitički je definisano u daljem tekstu.





Slika 4.7 Prostor – vreme dijagram kumuliranja i prenošenja poremećaja intervala sleđenja vozila

Od početka poluobrt vozilo 3 se kreće ravnomerno duž linije do stajališta „u“. Od stajališta „u“ na kretanje vozila 3 utiče primarni poremećaj  $\delta$ , koji se kao prost sekundarni poremećaj širi po stajalištima duž linije (jednačine 4.31 – 4.33).

$$h_{3,1} = 0, \quad (4.29)$$

$$h_{3,2} = 0, \quad (4.30)$$

...

$$h_{3,u} = h_{p,3,u} \quad (4.31)$$

$$h_{3,u+1} = h_{3,u} + h_{3,u} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.32)$$

$$h_{3,u+2} = h_{3,u+1} + h_{3,u+1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.33)$$

Od stajališta „v“ na kretanje vozila 3 utiče i poremećaj  $\gamma$ . Uticaj poremećaja  $\gamma$  se sa vozila 1 preko vozila 2 prenosi na kretanje vozila 3. Poremećaj intervala sleđenja vozila 3 se nakon stajališta „v“ širi kao složen sekundarni poremećaj.

$$h_{3,v} = h_{3,v-1} + h_{3,v-1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.34)$$

$$h_{3,v+1} = h_{3,v} + h_{3,v} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) - h_{2,v} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.35)$$

$$h_{3,v+2} = h_{3,v+1} + h_{3,v+1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) - h_{2,v+1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.36)$$

$$h_{3,v+3} = h_{3,v+2} + h_{3,v+2} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) - h_{2,v+2} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \quad (4.37)$$

Izražavanjem jednačina (4.35) i jednačina (4.36) preko veličine primarnih poremećaja  $h_{p,1,v}$  i  $h_{p,3,u}$  dobijaju se jednačina (4.38) i jednačina (4.39).

$$h_{3,v+2} = h_{p,3,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v+2-u} + h_{p,1,v} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2, \quad [\text{min}] \quad (4.38)$$

$$h_{3,v+3} = h_{p,3,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v+3-u} + 3 h_{p,1,v} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right), \quad [\text{min}] \quad (4.39)$$

Za analizirani slučaj postojanja primarnih poremećaja  $\gamma$  i  $\delta$ , dobijena zakonitost širenja složenog sekundarnog poremećaja intervala sleđenja vozila 3 nastavlja se na svim stajalištima koji slede do kraja linije (jednačina (4.40) i jednačina (4.41)).

$$h_{3,v+4} = h_{p,3,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v+4-u} + 6 h_{p,1,v} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^2, \quad [\text{min}] \quad (4.40)$$

$$h_{3,v+5} = h_{p,3,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{v+5-u} + 10 h_{p,1,v} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^3, \quad [\text{min}] \quad (4.41)$$

Na osnovu promene intenziteta širenja poremećaja po stajalištima duž linije, generiše se opšta jednačina širenja poremećaja intervala sleđenja za vozilo 3, jednačina (4.42).

$$h_{3,g} = h_{p,3,u} \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g-u} + h_{p,1,v} \frac{(g-v)(g-v-1)}{2} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^2 \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g-v-2}, \quad [\text{min}] \quad (4.42)$$

Za analizirani slučaj složeni sekundarni poremećaj nastao širenjem i slaganjem primarnih poremećaja  $\gamma$  i  $\delta$ , prenosi se nakon vozila 3 i na vozila koja slede po redu vožnje. Širenje poremećaja intervala sleđenja kod vozila 4 i vozila 5 utvrđeno je analogno sa postupkom za vozilo 3, a definisano je jednačinom (4.43) i jednačinom (4.44).

$$h_{4,g} = -h_{p,3,u} (g-u) \left( \frac{\lambda}{\mu} \right) \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g-u-1} - h_{p,1,v} \frac{(g-v)(g-v-1)(g-v-2)}{6} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^3 \left( 1 + \frac{\lambda}{\mu} \right)^{g-v-3} \quad (4.43)$$

$$h_{s,g} = h_{p,3,u} \frac{(g-v)(g-v-1)}{2} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^{g-u-2} + h_{p,1,v} \frac{(g-v)(g-v-1)(g-v-2)(g-v-3)}{24} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^4 \left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^{g-v-4} \quad (4.44)$$

Na osnovu promene intenziteta širenja poremećaja po polascima u redu vožnje i po stajalištima duž linije, generiše se opšta jednačina širenja složenog sekundarnog poremećaja intervala sleđenja na liniji JGPP-a, jednačina (4.45). Za slučaj delovanja „m“ primarnih poremećaja na „p“ različitih polazaka, opšti obrazac širenja poremećaja intervala sleđenja predstavlja sumu prostih elemenata u skladu sa relativnom pozicijom posmatranog polaska.

$$h_{k,g} = \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^m h_{p,k_l,n_j} \frac{(g-n_j)!}{(k-k_l)!(g-n_j-k+k_l)!} \left(-\frac{\lambda}{\mu}\right)^{k-k_l} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^{g-n_j-k+k_l}, [\text{min}] \quad (4.45)$$

gde je:

- $h_{k,g}$  – složeni sekundarni poremećaj intervala sleđenja vozila  $k$ , na stajalištu  $g$ ,
- $h_{p,k,n}$  – primarni poremećaj intervala sleđenja na polasku vozila  $k$ , na stajalištu  $n$ ,
- $g$  – broj stajališta po redu u odnosu na prvo stajalište na liniji,
- $n$  – broj stajališta po redu od prvog stajališta do stajališta primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila,
- $m$  – ukupan broj poremećaja na posmatranom polasku vozila,
- $j$  – redni broj poremećaja,
- $p$  – ukupan broj polazaka vozila sa poremećajem intervala sleđenja,
- $l$  – redni broj polaska vozila sa poremećajem u intervalu sleđenja

Složeni uticaj više primarnih poremećaja intervala sleđenja na ravnomernost kretanja vozila može se opisati kumulativnim delovanjem prostih elemenata definisanih jednačinom (4.15). Uticaj svakog prostog elementa u složenoj strukturi ukupnog poremećaja zavisi od lokacije nastanka i intenziteta primarnog poremećaja, pri čemu se lokacija poremećaja definiše pozicijom stajališta duž linije i polaskom vozila u redu vožnje.

U skladu sa ograničenjima, razvijeni deterministički matematički model širenja poremećaja intervala sleđenja se odnosi na sve linijske podisteme JGPP-a koji funkcionišu sa intervalima manjim od 15 minuta. Zbog izraženih problema sa ravnomernošću intervala sleđenja vozila, očekuje se da će model biti uglavnom primenjen na linijskim podistema JGPP-a koji funkcionišu u mešovitom toku (row B i row C).

### 4.3 ANALIZA UTICAJA PARAMETARA NA ŠIRENJE POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA VOZILA

Analogno radovima (Vučić, 1969; Daganzo, 2009; Xuan, Argote, i Daganzo, 2011; S.-X. He 2015), za potrebe analize uticaja parametara na širenje poremećaja, koristiće se parametar  $\beta$  da bi se opisao odnos intenziteta nakupljanja putnika i intenziteta ulaska putnika u vozilo. Parametar  $\beta$  je definisan jednačinom (4.46).

$$\beta = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.46)$$

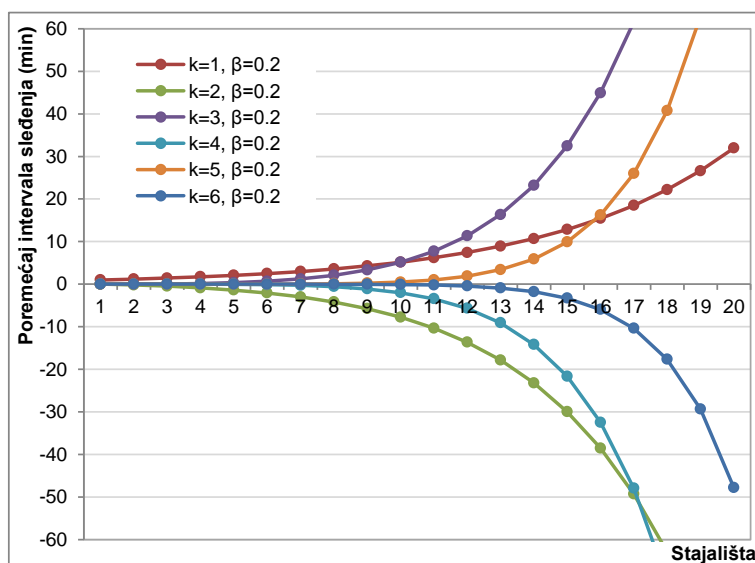
Tako da sada jednačina (4.15) dobija oblik funkcije  $h_{(h_p, s, k, \beta)}$ .

$$h_{(h_p, k, s, \beta)} = h_p \frac{(s-1)!}{(k-1)!(s-k)!} (-\beta)^{k-1} (1+\beta)^{s-k} \quad (4.47)$$

Na osnovu jednačine (4.47) analiziran je pojedinačan uticaj parametara na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila. Širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu zavisi od: veličine primarnog poremećaja ( $h_p$ ), parametra  $\beta$ , broja stajališta u nizu u odnosu na lokaciju primarnog poremećaja ( $s$ ) i pozicije vozila u redu vožnje ( $k$ ). Veličina primarnog poremećaja ima direktan uticaj na veličinu poremećaja intervala sleđenja vozila duž linije. Njegov uticaj je linearan i u daljem delu nije analiziran. U svim daljim analizama veličina primarnog poremećaja uzeta je kao konstanta koja iznosi 1 minut.

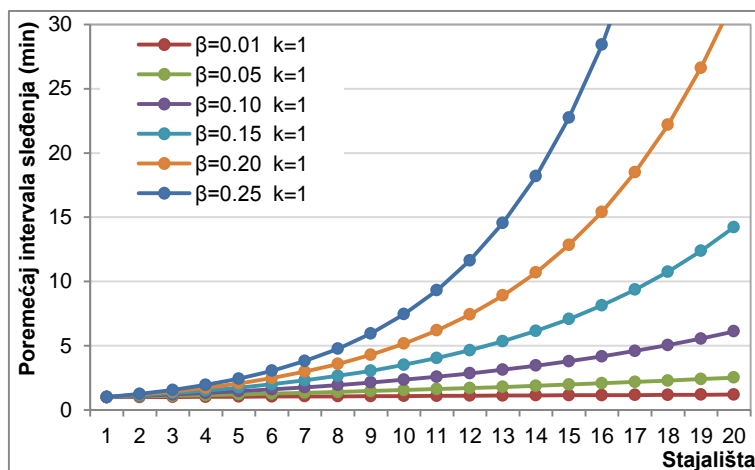
Širenje poremećaja intervala sleđenja vozila kao funkcija  $h_{(s, k, \beta)}$  može biti pozitivna ili negativna i definisana je na skupu realnih brojeva. Udaljenost vozila od mesta primarnog poremećaja ( $s$ ), kao i pozicija polaska vozila u redu vožnje ( $k$ ) definisani su na skupu prirodnih brojeva. Parametar  $\beta$  u skladu sa jednačinom (4.46) definisan je na poluotvorenom intervalu  $(0, 1]$ .

Kako bi se utvrdio uticaj parametara na širenje poremećaja intervala sleđenja, kreirani su grafici (Slika 4.8, Slika 4.9, Slika 4.10). Na njima je predstavljeno širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite kombinacije vrednosti parametara  $\beta$  i  $k$ .

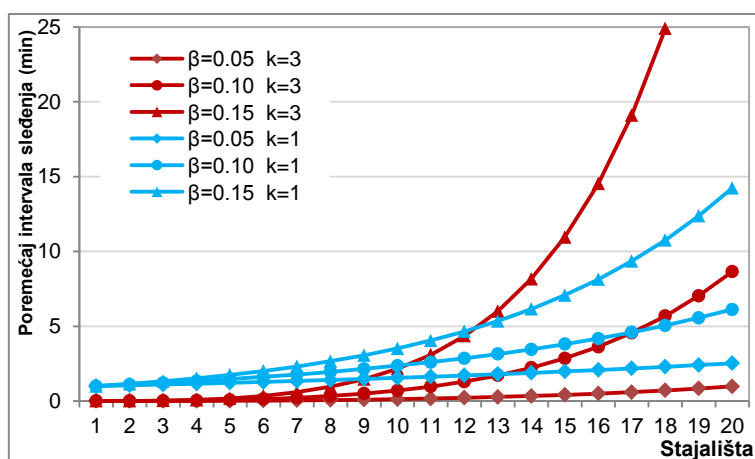


Slika 4.8 Širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite polaske ( $h_p=1$  min,  $\beta=0,2$ )

Sa slike 4.8 se vidi da funkcija poremećaja intervala sleđenja  $h_{(s, k, \beta)}$  na domenu definisanosti za polaske vozila 1, 3 i 5 monotono je rastuća, dok za polaske vozila 2, 4 i 6 monotono je opadajuća.



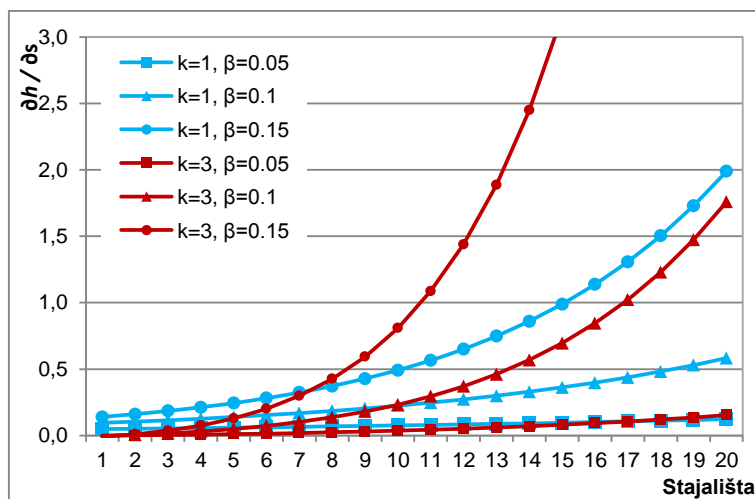
Slika 4.9 Širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite vrednosti parametra  $\beta$  ( $h=1$  min,  $k=1$ )



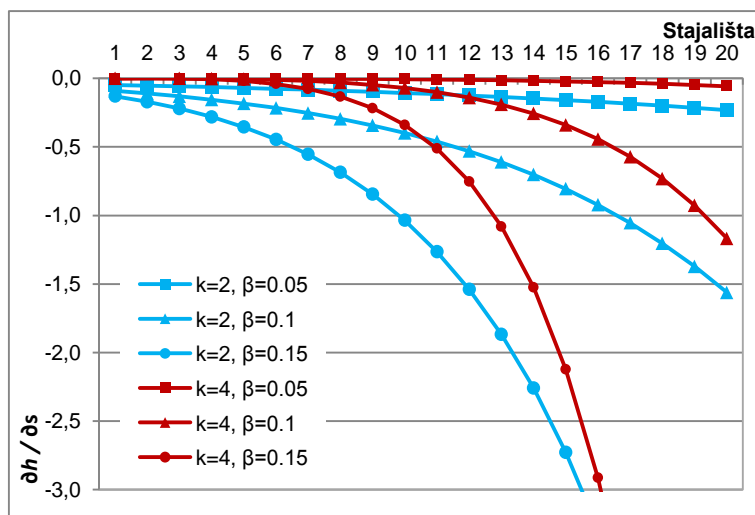
Slika 4.10 Širenje poremećaja intervala sleđenja u funkciji broja stajališta za različite vrednosti parametra  $\beta$  za vozilo 1 i 3 ( $h_i=1$  min)

Sa Slika 4.8, Slika 4.9 i Slika 4.10 vidi se da se priraštaj funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$  razlikuje po stajalištima u zavisnosti od parametra  $\beta$  i  $k$ . Povećanjem parametra  $\beta$  povećava se i priraštaj funkcije, dok parametar  $k$  između ostalog, menja i predznak funkcije.

U slučaju nastanka primarnog poremećaja intervala sleđenja, za stanje sistema od izuzetnog značaja je priraštaj funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$ . Kod visokog stepena priraštaja funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$  sistem prelazi u nekontrolisano stanje, praćeno grupisanjem vozila na liniji. U skladu sa prethodno definisanim, moguće je izvršiti analizu osetljivosti širenja poremećaja intervala sleđenja na parametre  $s$  i  $\beta$ . Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila prikazana je kroz parcijalne izvode  $\frac{\partial h}{\partial s}$  i  $\frac{\partial h}{\partial \beta}$ .



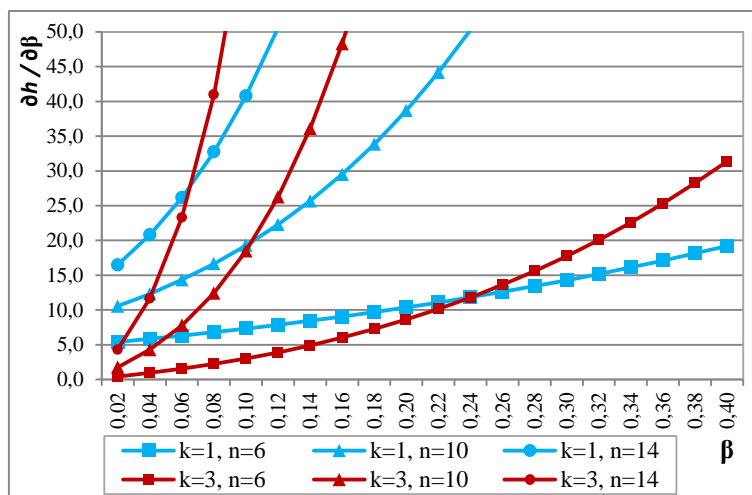
Slika 4.11 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar  $s$  za različite vrednosti parametra  $\beta$  za vozilo 1 i 3 ( $h_i=1$  min)



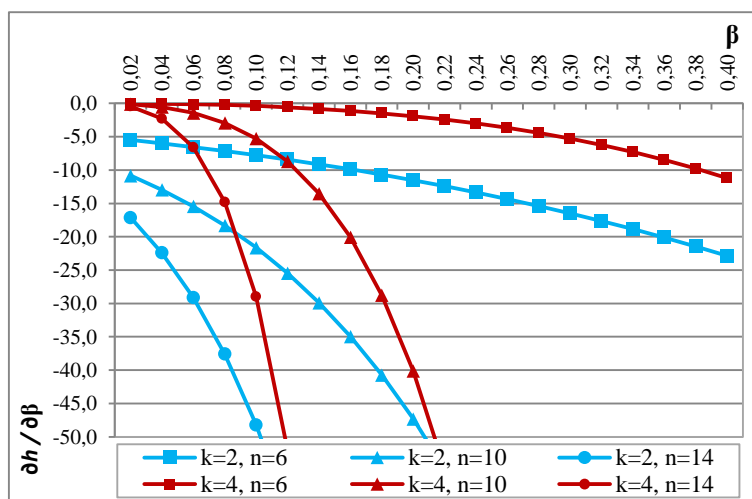
Slika 4.12 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar  $s$  za različite vrednosti parametra  $\beta$  za vozilo 2 i 4 ( $h_p=1$  min)

Sa Slika 4.11 i Slika 4.12 vidi se da udaljavanjem vozila od primarnog poremećaja intervala sleđenja, osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja na parametar  $s$  uvek raste (priraštaj je pozitivan) za neparne polaske vozila, odnosno opada (priraštaj je negativan) za polaske vozila sa parnim rednim brojem. Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja na parametar  $s$  povećava se porastom parametra  $\beta$ .

Na osnovu Slika 4.13 i Slika 4.14, za utvrđivanje osetljivosti širenja poremećaja intervala sleđenja na parametar  $\beta$  izvodi se analogan zaključak kao za osetljivost na parametar  $s$ . U poređnom analizom parcijalnih izvoda  $\frac{\partial h}{\partial s}$  i  $\frac{\partial h}{\partial \beta}$  dolazi se do zaključka da je širenje poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu osetljivije na promenu parametara  $\beta$ , nego na promenu parametara  $s$ . Uopšteno posmatrano, može se zaključiti da u zavisnosti od veličine parametara  $s$ ,  $k$  i  $\beta$  zavisi priraštaj funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$ .



Slika 4.13 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar  $\beta$  za različite vrednosti parametra  $s$  za vozilo 1 i 3 ( $h_p=1$  min)

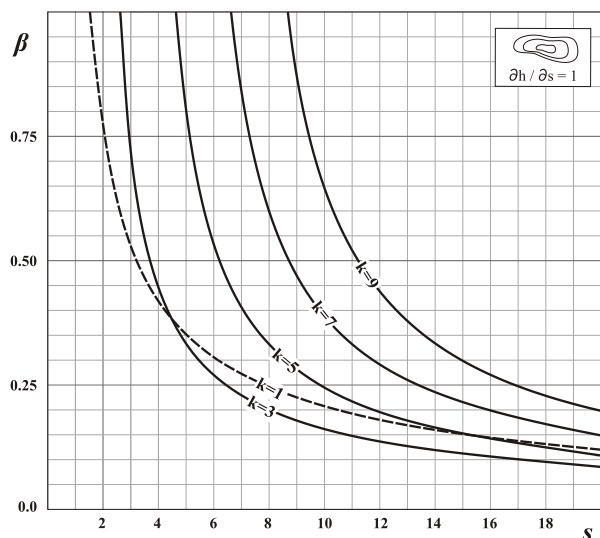
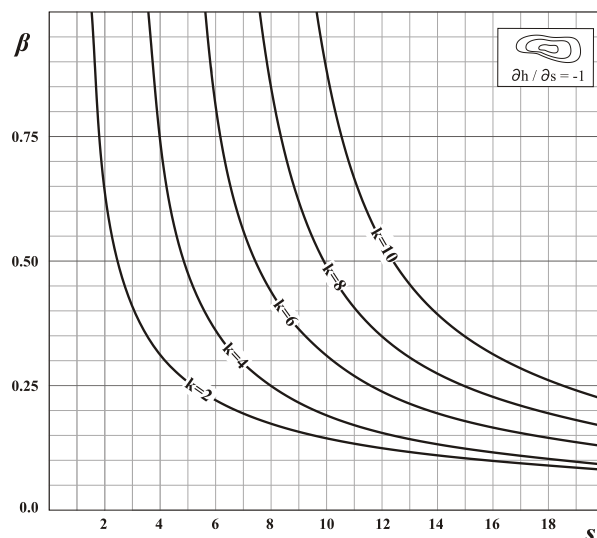
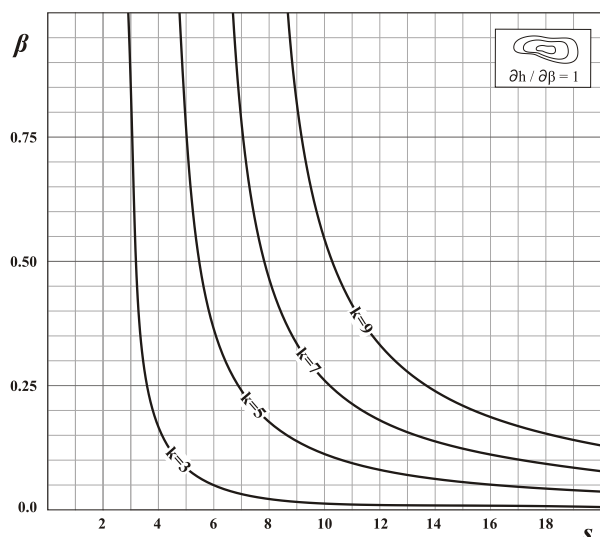
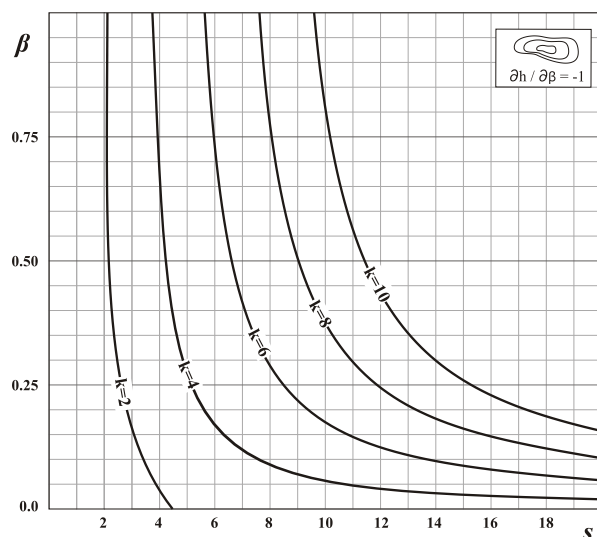


Slika 4.14 Osetljivost širenja poremećaja intervala sleđenja vozila na parametar  $\beta$  za različite vrednosti parametra  $s$  za vozilo 2 i 4 ( $h_p=1$  min)

Sa Slika 4.11 – Slika 4.14 se vidi da određeni kritični priraštaj funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$  dovodi sistem u nekontrolisano stanje. Za pretpostavljenu veličinu kritičnog priraštaja formirane su krive zajedničkog uticaja parametara  $s$ ,  $k$  i  $\beta$  (Slika 4.15). Pretpostavljen kritičan priraštaj funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$  je ugao rasta funkcije od 45 stepeni za neparne polaske vozila i -45 stepeni za parne polaske vozila.

Sa prvog grafika na slici 4.15 vidi se razlika u zakonitosti pružanja krive  $k=1$  u odnosu na ostale. Razlika u pružanju krive ( $k=1$ ) posledica je činjenice da na širenje intervala sleđenja vozila 1 ne postoji uticaj prethodnog vozila.

Predstavljene krive na slici 4.15 potvrđuju konstataciju da je širenje poremećaja intervala sleđenja osetljivije na promenu parametra  $\beta$ , nego na promenu parametara  $s$ . Za određenu vrednost parametra  $\beta$  i definisan broj stajališta na liniji  $s$ , poremećaj intervala sleđenja vozila slabi prilikom prelaska na sledeće vozilo. Ukoliko se ne dostignu vrednosti kritičnog priraštaja funkcije  $h_{(s,k,\beta)}$  sistem ima tendenciju da se smiri.

Grafički prikaz krivi  $\partial h/\partial s$  za priraštaj funkcije od 45 stepeniGrafički prikaz krivi  $\partial h/\partial s$  za priraštaj funkcije od - 45 stepeniGrafički prikaz krivi  $\partial h/\partial \beta$  za priraštaj funkcije od 45 stepeniGrafički prikaz krivi  $\partial h/\partial \beta$  za priraštaj funkcije od - 45 stepeni

Slika 4.15 Grafički prikaz krivi za priraštaj funkcije od 45 stepeni

#### 4.4 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U postupku modeliranja, mnogi procesi u sistemu JGPP-a oblikovani su tako da odgovaraju potrebama determinističkog modela. Prednosti modela su njegova jednostavnost, činjenica da se može primeniti na autobuski i na šinski podsistem i način fokusiranja na procese koji uzrokuju grupisanje vozila na liniji. Model se može unaprediti uzimanjem u obzir više parametara. Uvođenjem novih promenljivih dodatno bi se iskomplikovao problem i dovela bi se u pitanje mogućnost rešavanja problema analitičkom matematikom. Sa druge strane, za saobraćajnog inženjera i upravljača JGPP-om od značaja je praktičnost i jednostavnost modela.



Glavni nedostatak modela je neuzimanje u obzir velikog broja varijacija, koje postoje kod vremena vožnje između stajališta, intenziteta nakupljanja putnika po stajalištima i intenziteta ukrcavanja putnika u vozilo. Zanemarivanje stohastičke prirode pojedinih procesa u modelu objašnjava se činjenicom da navedene varijacije predstavljaju uzroke nastanka primarnog poremećaja intervala (poglavlje 3.4) i one ne utiču na širenje poremećaja intervala u sistemu.

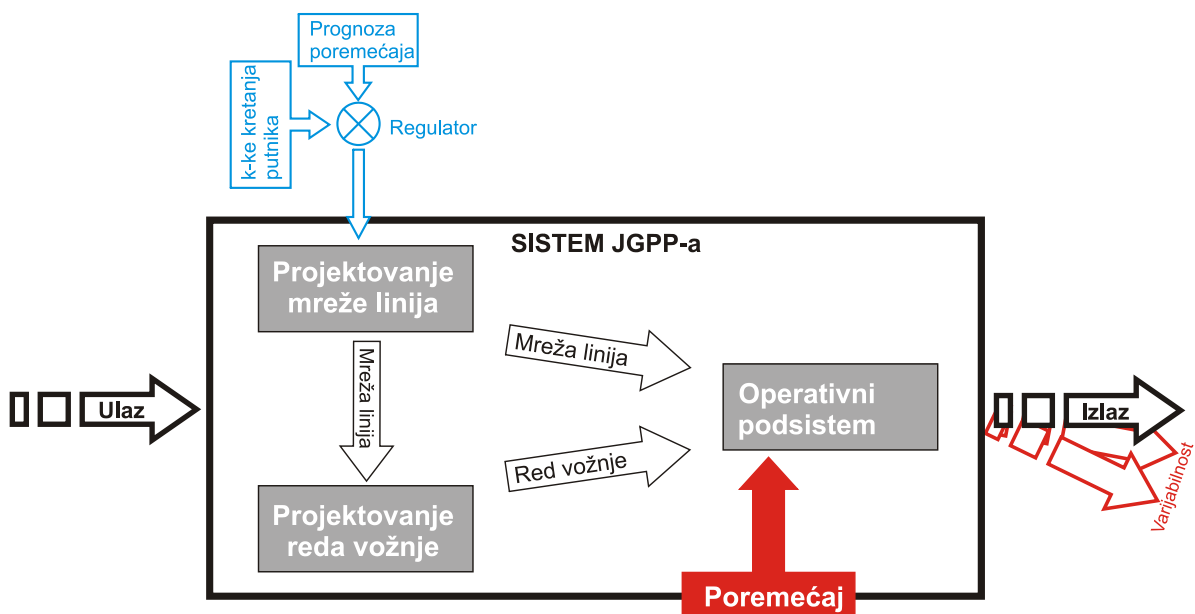
Na osnovu determinističkog modela izvršena je analiza i rangiranje uticaja parametara na širenje poremećaja intervala sleđenja. Širenje poremećaja intervala sleđenja vozila rezultat je složenog dejstva većeg broja parametara. Posmatranjem uticaja samo jednog parametra ne dobija se realna slika o širenju poremećaja. U modelu kao dominantni parametri su prepoznati: broj stajališta po redu u odnosu na lokaciju stajališta primarnog poremećaja i parametar  $\beta$ .

Rastom intenziteta nakupljanja u odnosu na intenzitet ulaska putnika u vozilo, raste i osetljivost sistema javnog prevoza na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila (Vučić, 1969). Nastali poremećaj intervala sleđenja kumulira se po stajalištima duž linije. Veći broj stajališta na liniji stvara veću mogućnost za kumuliranje poremećaja i dostizanje nekontrolisanog stanja sistema. Kod linija javnog gradskog prevoza, dužina trase i broj stajališta na liniji proporcionalno utiču na neravnomernost intervala sleđenja vozila (X. Chen i ostali, 2009; Pitka, Simeunović, i Šaulić, 2015; Daganzo, 1997; Niels van Oort, 2011). Na osnovu izvršene analize može se zaključiti da je širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu osetljivije na promenu parametra  $\beta$ , nego na broj stajališta na liniji.

Na osnovu definisanih parametara u modelu i izvršene analize, zaključuje se da je u velikoj meri moguće uticati na poremećaj intervala sleđenja u fazi projektovanja sistema. Optimizacijom utvrđenih parametara u fazi projektovanja povećava se otpornost sistema na širenje poremećaja intervala sleđenja. Na primer, u fazi projektovanja mreže linija preferiranjem radijalnih linija u odnosu na dijametralne pozitivno se utiče na ravnomernost intervala sleđenja vozila. Povećanje intenziteta izmene putnika utiče na parametar  $\beta$ , a kao mere mogu se preduzeti: promena režima izmene, uvođenje niskopodnih vozila, izmene u sistemu naplate i čekiranja putnika. Za postizanje najboljih rezultata ravnomernosti intervala sleđenja vozila na nekoj liniji javnog gradskog prevoza, pored operativnih mera i strategija, u projektnoj fazi sistema može se značajno uticati na parametre koji ga izazivaju.

## 5 OPTIMIZACIJA STATIČKIH ELEMENATA LINIJE U CILJU POVEĆANJA OTPORNOSTI SISTEMA NA POREMEĆAJ

U oblasti upravljanja poremećajem intervala sleđenja, najveći broj modela i postupaka se bazira na smirivanju nastalih poremećaja, dok je manje pažnje posvećeno povećanju otpornosti sistema JGPP-a na nastanak i širenje poremećaja. U okviru ovog poglavlja prikazan je postupak optimizacije ravnomernosti intervala sleđenja vozila u fazi projektovanja sistema, koji se klasifikuje u načine upravljanja sistemom u otvorenoj sprezi (Slika 5.1). Razvijeni postupak optimizacije kombinuje realno utvrđene karakteristike kretanja putnika na liniji i simulacije širenja poremećaja intervala sleđenja duž linije. Simulacije širenja poremećaja se vrše na osnovu determinističkog modela definisanog u prethodnom poglavlju.



Slika 5.1 Upravljanje poremećajem intervala sleđenja u fazi projektovanja sistema

U prethodnom poglavlju utvrđeno je da linije sa većim brojem stajališta stvaraju veće mogućnosti za kumuliranje poremećaja intervala sleđenja. Prilikom projektovanja linija treba uzeti u obzir da se povećanjem broja stajališta na liniji i produžavanjem linije smanjuje pouzdanost funkcionisanja sistema. Projektovanje kraćih linija, preferiranje radijalnih u odnosu na dijametralne linije kao i deljenje postojećih linija stvara dodatnu otpornost sistema na širenje i kumuliranje poremećaja intervala sleđenja.

Razvijeni postupak optimizacije je ograničen. Model širenja poremećaja intervala sleđenja, konačna funkcionalnost linija dobijenih podelom i praktična primenljivost postupka optimizacije, usloveli su sledeća ograničenja:

- Projektovani intervali sleđenja vozila na liniji je manji od 15 minuta,
- Postojanje terminusa/okretnice (ili prostornih uslova za izgradnju) u tački podele linije je obavezno,
- Svaka linija dobijena podelom, posmatrana zasebno, mora predstavlјati funkcionalnu celinu koja je u skladu sa linijama želja putnika.

Razvijeni postupak optimizacije statičkih elemenata linije je primenljiv na sve linije u sistemu JGPP-a ukoliko su ispunjena prethodno definisana ograničenja. Prema načinu pružanja trase, dijametralna linija se sastoji iz dve radijalne linije. U najvećem broju slučajeva u praksi, podelom dijametralne linije nastaju dve prostorno funkcionalne linije. Budući da je podela ostalih vrsta linija (prema pružanju trase) na dve funkcionalne linije komplikovana i često nemoguća procedura, u daljem delu rada predmet optimizacije će isključivo biti dijametralne linije.

U skladu sa prethodno navedenim izrađen je postupak optimizacije kojim se sa aspekta vremena boravka putnika u sistemu i dostignute ravnomernosti intervala sleđenja vrednuje podela dijametralne linije na dve radijalne. Postupak se sastoji iz četiri faze, pri čemu izlazni podaci iz jedne faze predstavljaju ulazne podatke za narednu fazu.

Postupak optimizacije između ostalog zahteva formiranje modela koji proračunava razliku srednjeg vremena boravka putnika u sistemu. Modelom su uzete u obzir sve komponente vremena boravka putnika u sistemu na predmetnoj liniji. Da bi se jednostavnije sagledao uticaj podele dijametralne linije na vreme boravka putnika u sistemu, prvo je analizirano putovanje jednog putnika, a zatim je formiran model za sve putnike na predmetnoj liniji.

## 5.1 CILJEVI OPTIMIZACIJE

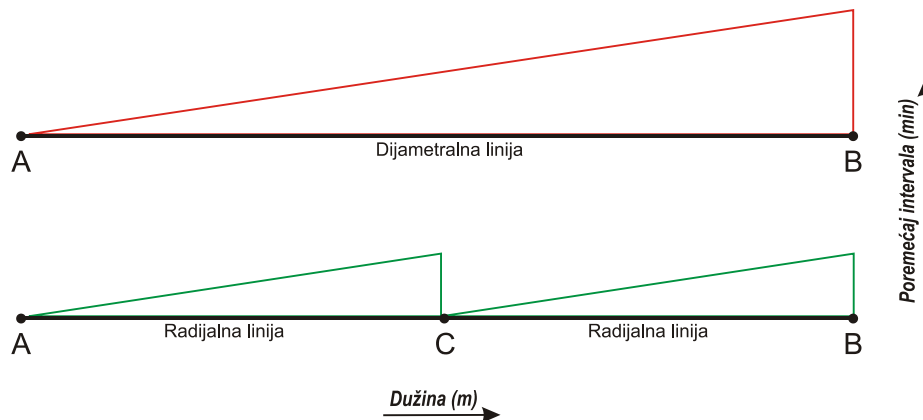
Ukoliko postoje tehničko-prostorni uslovi u centru grada (terminus), nesporno je da se deljenjem dijametralne linije na dve radijalne linije mogu ostvariti značajna poboljšanja u otpornosti sistema na širenje poremećaja, odnosno moguće je povećati ravnomernost intervala sleđenja vozila. Međutim, postavlja se pitanje: Da li će predložena optimizacija pozitivno uticati i na krajnji kvalitet usluge koji sistem treba da pruži putniku? U skladu sa prethodno navedenim ispred postupka optimizacije postavljena su tri cilja:

1. Osnovni (prvi) cilj – povećati ravnomernost intervala sleđenja vozila,
2. Drugi cilj – obezbediti praktičnu primenljivost postupka,
3. Treći cilj – ne narušiti postojeći kvalitet usluge.

U proceduri odlučivanja navedeni ciljevi su ravnopravni. Postupkom optimizacije potrebno je dostizanje sva tri cilja, kako se ne bi narušio postojeći kvalitet usluge i obezbedila praktična primenljivost postupka.

### Osnovni cilj

U postupku optimizacije, smanjenje efekta širenja poremećaja intervala sleđenja duž linije postiže se podelom dijametralne linije na dve radijalne linije. Podela linije prekida proces kumuliranja poremećaja, pa je nesporno da se stepen ravnomernosti intervala sleđenja povećava (Slika 5.2), odnosno dostiže se osnovni cilj optimizacije.



Slika 5.2 Uticaj podele dijametralne linije na ravnomernost intervala sleđenja vozila

### Drugi cilj

Najbitnija procedura u postupku optimizacije je određivanje tačke podele linije. Od karakteristika putničkih tokova i karakteristika tačke podele linije zavise efekti optimizacije, ali i mogućnost praktične primene predloženog rešenja. Tačka podele linije se može birati na dva načina:

- I. na osnovu protoka putnika,
- II. na osnovu postojeće infrastrukture.

Prvi način određivanja tačke podele linije podrazumeva izbor stajališta iz središnjeg dela linije sa najmanjim protokom putnika. Ovaj način podele dijametralne linije generiše najmanji broj presedanja putnika, ali sa druge strane značajno može da utiče na realnu primenu predloženog rešenja. Izabrano stajalište mora biti izvedeno kao terminus/okretnica ili bar moraju postojati prostorni uslovi za izgradnju terminusa/okretnice. S obzirom da se kod prvog načina izbora tačke podele ne uzimaju u obzir prostorno-tehnički uslovi na trasi linije, drugi cilj optimizacije za ovaj način određivanja tačke podele je uslovno dostižan.

U postupku optimizacije tačka podele dijametralne linije će se određivati na osnovu prostorno-tehničkih uslova na trasi linije, odnosno na osnovu poznate pozicije postojećeg

terminusa/okretnice u užem gradskom jezgru ili na osnovu prostornih uslova za izgradnju terminusa/okretnice. Određivanje tačke podele linije drugim (II) načinom, postiže se drugi cilj modela optimizacije.

### Treći cilj

Treći cilj optimizacije ravnomernosti intervala sleđenja vozila podrazumeva da se predloženim postupkom ne naruši postojeći kvalitet usluge. Razvijenim postupkom optimizacije vrši se podela dijametralne linije na dve radijalne linije. Na obe radijalne linije se zadržavaju postojeći interval sleđenja i kapaciteti vozničkih jedinica. Razvijenim postupkom optimizacije, kapacitet linije se ne menja.

Prethodna istraživanja u ovoj oblasti su pokazala da povećanje ravnomernosti intervala sleđenja pozitivno utiče na komfor putnika u vozilu i vreme čekanja putnika na stajalištu (Simeunović i ostali, 2012). Međutim, podelom dijametralne linije na dve radijalne, putnicima koji tokom vožnje prelaze tačku podele stvara se dodatno presedanje i time produžava vreme putovanja.

Podelom dijametralne linije formiraju se dve radijalne linije sa zajedničkim terminusom u užem gradskom jezgru. Kako se ne bi vršilo prenošenje poremećaja sa jedne na drugu radijalnu liniju, a u skladu sa osnovnim ciljem, nije moguće organizovati koordinisano presedanje putnika između novoformiranih radijalnih linija. Vreme dolaska vozila prve radijalne linije na zajednički terminus predstavlja slučajan proces tako da očekivano vreme presedanja putnika zavisi isključivo od projektovanog intervala sleđenja vozila na drugoj liniji.

U postupku optimizacije trasa linije se ne menja pa podela dijametralne linije nema uticaja na vreme kretanja putnika od izvora putovanja do stajališta i vreme kretanja putnika od stajališta do cilja putovanja. Postupak optimizacije utiče samo na vreme boravka putnika u sistemu JGPP-a (Slika 5.3).

S obzirom na to da se podelom dijametralne linije kapacitet linije ne menja, a komfor putnika povećava, konačni kvalitet usluge optimizovane varijante (treći cilj) isključivo zavisi od promene u vremenu boravka putnika u sistemu. U podpoglavlju 5.2 razvijen je model kojim se utvrđuje razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu optimizovane varijante i postojećeg načina organizacije prevoza. Budući da se trasa linije i gravitaciono područje nakon optimizacije ne menjaju, promene u vremenu boravka putnika predstavljaju i promene u vremenu putovanja putnika.

Na osnovu postavljenih ciljeva a u skladu sa prethodno navedenim, može se zaključiti da uspešnost postupka optimizacije zavisi od sledećih parametara:

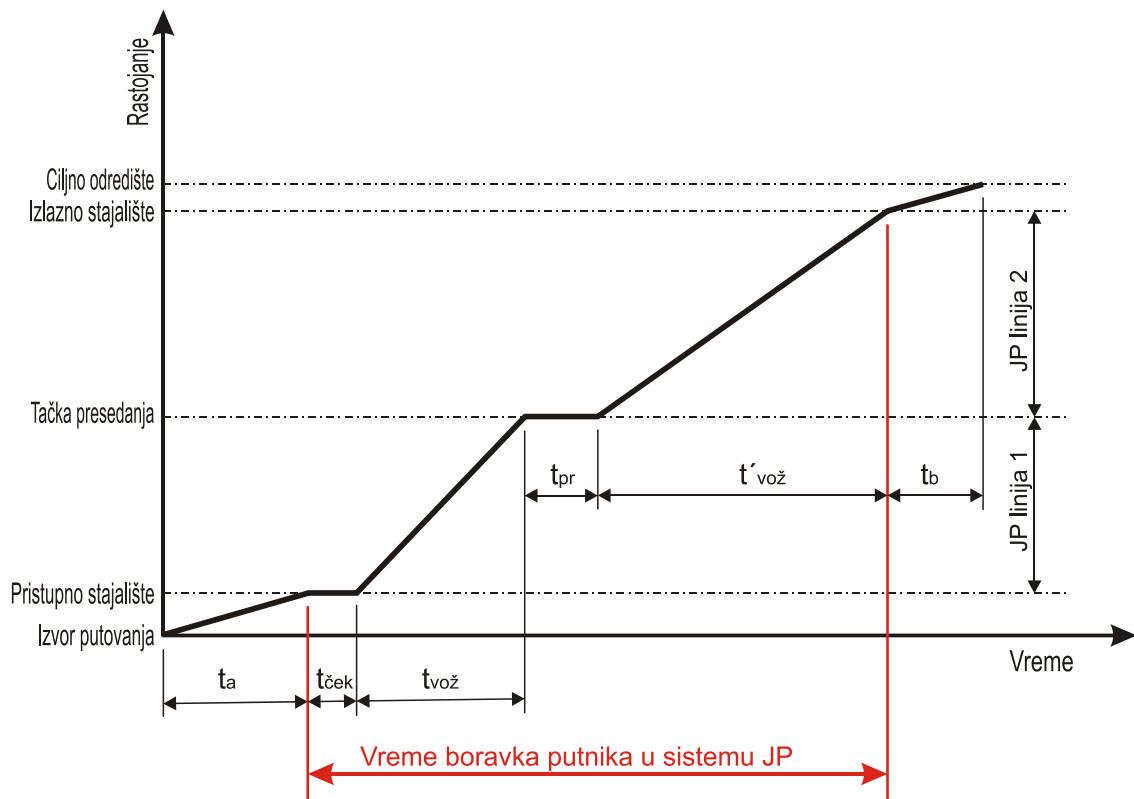
- protok putnika duž linije,
- projektovani interval sleđenja vozila,
- ravnomernost intervala sleđenja vozila,
- broj stajališta na liniji,
- pozicija zajedničkog terminusa na dijametralnoj liniji,
- intenzitet nakupljanja putnika po stajalištima duž linije,
- prosečan intenzitet ulaska putnika u vozilo.

## 5.2 DODATNO VREME BORAVKA PUTNIKA U SISTEMU

### 5.2.1 Struktura vremena boravka putnika u sistemu JGPP-a

U sistemu JGPP-a, vreme putovanja putnika od izvora do cilja sastoji se od nekoliko vremenskih komponenti:

- vreme kretanja putnika od izvora putovanja do stajališta ( $t_a$ ),
- vreme čekanja na stajalištu ( $t_{ček}$ ),
- vreme vožnje ( $t_{vož}$ ),
- vreme presedanja ( $t_{pr}$ ) i
- vreme kretanja od stajališta do cilja putovanja ( $t_b$ ).



Slika 5.3 Vreme boravka putnika u sistemu JGPP

Vremenski period koje putnik provede u sistemu JGPP-a započinje od trenutka dolaska putnika na stajalište, a završava se izlaskom putnika iz vozila javnog prevoza i napuštanjem stajališta (Slika 5.3). Vreme boravka putnika u sistemu JGPP-a zavisi od: veličine intervala sleđenja, ravnomernosti intervala sleđenja, uticaja mešovitog saobraćaja i dr. Vreme koje putnik provede u sistemu JGPP-a ( $T_{pus}$ ) sastoji se iz sledećih komponenti:

- Vreme čekanja na stajalištu ( $t_{ček}$ ),
- Vreme vožnje ( $t_{vož}$ ),
- Vreme presedanja ( $t_{pr}$ ).

$$T_{pus} = t_{ček} + t_{vož} + t_{pr}, \quad [\text{min}] \quad (5.1)$$

### Vreme čekanja putnika na stajalištu

Istraživanja su pokazala da na linijama gde su projektovani intervali sleđenja manji od 15 minuta (u urbanim sredinama), putnici dolaze na stajalište ne konsultujući red vožnje. Na linijama sa malim intervalom sleđenja prosečno vreme čekanja putnika je jednako polovini intervala sleđenja vozila. Na pomenutim linijama od izuzetnog značaja je ravnomernost intervala sleđenja vozila duž linije. Budući da putnici dolaze na stajalište ne konsultujući red vožnje, tačnost nije od presudnog značaja kako za korisnike tako i za održavanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila.

Za slučaj ravnomernog intervala sleđenja prosečno vreme čekanja jednog putnika se definiše sledećom jednačinom.

$$t_{ček} = \frac{i_p}{2}, \quad [\text{min}] \quad (5.2)$$

U uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja, prosečno vreme čekanja putnika zavisi i od veličine nastalog poremećaja, jednačina (5.3):

$$t_{ček} = \frac{i_p + h}{2}, \quad [\text{min}] \quad (5.3)$$

Gde je:

$i_p$  – projektovani interval sleđenja vozila,

$h$  – poremećaj interval sleđenja vozila.

### Vreme vožnje

Vreme vožnje putnika je vremenski period koji putnik provede u vozilu JGPP-a i sastoji se od zbira vremena zadržavanja vozila na stajalištima ( $t_s$ ) i vremena kretanja vozila između stajališta ( $t_v$ ).

$$t_{vož} = \sum t_s + \sum t_v, \quad [\text{min}] \quad (5.4)$$

Vreme zadržavanja vozila na stajalištu je opisano u poglavlju 4.1.1 i za ravnomeran interval sleđenja vozila se definiše jednačinom (4.4). U uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja, vreme zadržavanja vozila na stajalištu se definiše sledećom jednačinom.

$$t_s = t_{izm} = \frac{\lambda}{\mu} (i + h), \quad [\text{min}] \quad (5.5)$$

Vreme kretanja vozila između stajališta je opisano u poglavlju 4.1.2.

### Vreme presedanja

Vreme presedanja je vremenski period koji putnik provede u procesu prelaska sa jedne na drugu liniju JGPP-a, odnosno vremenski period od izlaska putnika iz jednog vozila do ulaska u drugo vozilo JGPP-a. Vreme presedanja putnika zavisi od:

- vremena pešačenja putnika između stajališta dve linije,
- intervala sleđenja vozila linije na koju se preseda,
- ravnomernosti intervala sleđenja linije na koju se preseda i
- postojanja koordinacije reda vožnje između linija.

Postupak optimizacije za formirane radijalne linije podrazumeva postojanje zajedničkog terminusa ili okretnice u centralnom gradskom području (nema pešačenja između stajališta). Vremenski koordinisano presedanje između linija ne postoji. Vreme presedanja u modelu optimizacije isključivo zavisi od veličine i ravnomernosti intervala sleđenja vozila linije na koju se preseda. Za slučaj ravnomernog intervala sleđenja prosečno vreme presedanja jednog putnika definiše se jednačinom (5.6).

$$t_{pr} = \frac{i_p}{2}, \quad [\text{min}] \quad (5.6)$$

U uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja, prosečno vreme presedanja jednog putnika zavisi i od veličine nastalog poremećaja, jednačina (5.7).

$$t_{pr} = \frac{i_p + h}{2}, \quad [\text{min}] \quad (5.7)$$

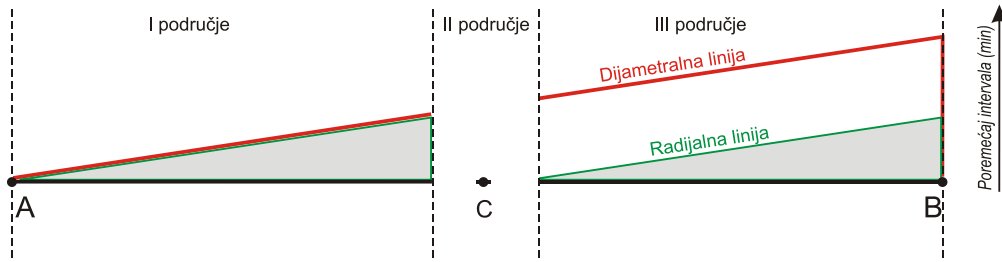
### **5.2.2 Model za proračun dodatnog vremena boravka jednog putnika u sistemu**

U okviru ovog poglavlja formiran je deterministički model za proračun razlike u vremenu boravka jednog putnika u sistemu između dve varijante organizacije prevoza. Prva varijanta podrazumeva prevoz sa jednom dijametralnom linijom, a druga varijanta podrazumeva organizaciju prevoza sa dve radijalne linije. Cilj izrade ovog modela je sagledavanje uticaja karakteristika kretanja putnika na vreme boravka putnika u sistemu, za slučaj podele dijametralne linije na dve radijalne.

Podelom dijametralne linije na dve radijalne stvorena su tri karakteristična područja koja imaju različit uticaj na vreme boravka putnika u sistemu. Ako se posmatra smer putovanja od terminusa A ka terminusu B onda se razlikuju sledeća područja (Slika 5.4):

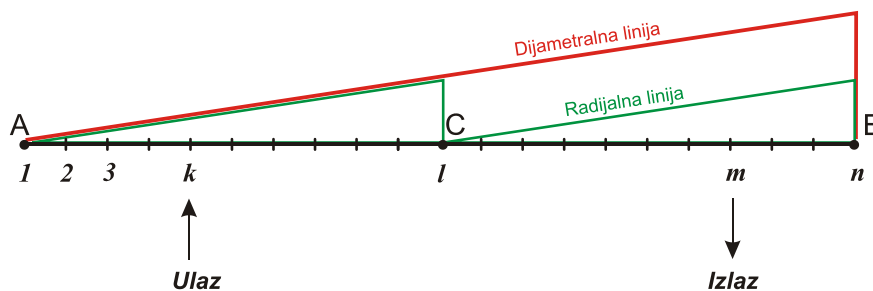
- područje od terminusa A do terminusa C,
- područje terminusa C,
- područje od terminusa C do terminusa B.





Slika 5.4 Karakteristična područja linije od značaja za vreme boravka putnika u sistemu

Za analizu uticaja definisanih područja na vreme boravka putnika u sistemu JGPP-a, formiran je deterministički model. Model izračunava razliku u vremenu boravka jednog putnika u sistemu između dve varijante organizacije prevoza.



Slika 5.5 Grafički prikaz kretanja putnika duž linije JGPP-a

Na liniji AB analizira se kretanje putnika koji dolazi na stajalište „k“, a izlazi na stajalištu „m“ (Slika 5.5). Linija se sastoji od „n“ stajališta. Analiza je vršena samo za kretanje putnika u smeru od terminusa A ka terminusu B. Vreme koje jedan putnik provede u sistemu ( $T_{pus}$ ) na predmetnoj liniji definisano je jednačinom (5.8).

$$T_{pus} = t_{ček} + \sum t_s + \sum t_v + t_{pr} , \text{ [min]} \quad (5.8)$$

### Dijametralna linija

Kada se prevoz realizuje sa jednom dijametralnom linijom, vreme koje putnik provede u sistemu ne sadrži vreme presedanja i izražava se jednačinom (5.9).

$$T_D = t_{ček} + \sum t_s + \sum t_v , \text{ [min]} \quad (5.9)$$

Za slučaj postojanja poremećaja intervala sleđenja vozila na liniji, vreme koje putnik provede u sistemu (jednačina (5.10)) se opisuje preko osnovnih parametara kojima se definiše širenje poremećaja intervala sleđenja. Jednačina (5.10) se dobija kada se jednačina (5.9) izrazi preko jednačine (5.3) i jednačine (5.6).

$$T_D = \frac{i + h_k}{2} + \sum_{j=k+1}^{m-1} \left( (i + h_j) \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) \right) + \sum_{j=k+1}^m t_{vj} , \text{ [min]} \quad (5.10)$$

Dve radijalne linije

Kada se prevoz realizuje sa dve radijalne linije, vreme koje putnik provede u sistemu je kompleksno i definisano jednačinom (5.11).

$$T_{2R} = t_{ček} + \sum_1^{l-1} t_s + \sum_1^{l-1} t_v + t_{pr} + \sum_{l+1}^{n-1} t_s + \sum_l^{n-1} t_v, \quad [\text{min}] \quad (5.11)$$

Za slučaj postojanja poremećaja intervala sleđenja vozila na liniji, vreme koje putnik provede u sistemu (obe radijalne linije) se opisuje preko osnovnih parametara kojima se definiše širenje poremećaja intervala sleđenja (jednačina (5.12)). Jednačina (5.12) se dobija kada se jednačina (5.11) izrazi preko jednačina (5.3) i jednačine (5.6).

$$T_{2R} = \frac{i + h_k}{2} + \sum_{j=k+1}^{l-1} \left( (i + h_j) \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) \right) + \sum_{j=k+1}^l t_{vj} + \frac{i}{2} + \sum_{j=l+1}^{m-1} \left( (i + h'_j) \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) \right) + \sum_{j=l+1}^m t_{vj} \quad (5.12)$$

Dodatno vreme boravka putnika u sistemu

Razlika između vremena boravka putnika u sistemu (jednačina (5.13)), kada se prevoz realizuje dijametralnom linijom i kada se prevoz realizuje sa dve radijalne linije, dobija se oduzimanjem jednačine (5.12) od jednačine (5.10). Dobijena razlika predstavlja dodatno vreme boravka putnika u sistemu kao posledica podele linije.

$$T_{D-2R} = T_D - T_{2R} = \sum_{j=l+1}^{m-1} \left( (h_j - h'_j) \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) \right) + (i + h_l) \left( \frac{\lambda_l}{\mu} \right) - \frac{i}{2}, \quad [\text{min}] \quad (5.13)$$

Gde je:

- $T_D$  – vreme koje putnik provede u sistemu JGPP-a koristeći dijametralnu liniju,
- $T_{2R}$  – vreme koje putnik provede u sistemu JGPP-a koristeći dve radijalne linije,
- $\lambda_j$  – intenzitet nakupljanja putnika na stajalištu „j“,
- $\mu$  – Intenzitet ulazaka putnika u vozilo,
- $h_j$  – poremećaj intervala sleđenja vozila na stajalištu „j“,
- $h'_j$  – poremećaj intervala sleđenja vozila na stajalištu „j“ za drugu radijalnu liniju,
- $i$  – projektovani interval sleđenja vozila na liniji.

Na osnovu jednačine (5.10), jednačine (5.12) i jednačine (5.13) zaključuje se da uticaj podele dijametralne linije na vreme boravka putnika u sistemu između ostalog zavisi i od karakteristika kretanja posmatranog putnika.

Naredna analiza se odnosi samo na kretanje putnika u smeru od terminusa A ka terminusu B, a doneti zaključci važe i za drugi smer posmatrano obrnutim redosledom (od B ka A).

Putnici koji se voze samo na radijalnoj liniji AC i ne prelaze tačku podele linije, nemaju promene u vremenu putovanja, odnosno ne postoji uticaj podele linije. Pozitivni efekti podele

utiču na putnike koji se voze na radijalnoj liniji CB, koja sledi posle zajedničkog terminusa. U pozitivne efekte podele između ostalog se svrstavaju: smanjeno vreme čekanja putnika na stajalištu, skraćeno vreme vožnje, povećanje komfora putnika u vozilu.

Putnici koji tokom putovanja prelaze tačku podele linije pored pozitivnih efekata imaju i vremenske gubitke u vidu dodatnog vremena presedanja na terminusu C. Odnos pozitivnih i negativnih efekata zavisi isključivo od:

- veličine intervala sleđenja vozila,
- broja stajališta koje putnik prelazi na radijalnoj liniji CB,
- veličine poremećaja intervala sleđenja i
- parametara koji utiču na širenje poremećaja.

Sa povećanjem broja pređenih stajališta na radijalnoj liniji CB povećava se i koristan efekat optimizacije za posmatranog putnika. Broj pređenih stajališta na radijalnoj liniji AC ne utiče na vreme koje će putnik provesti u sistemu nakon optimizacije. Negativan efekat presedanja, izražen vremenom presedanja putnika, zavisi od intervala sleđenja linije na koju se preseda i ravnomernosti intervala sleđenja vozila u samom polasku.

### 5.3 FAZE POSTUPKA OPTIMIZACIJE

U ovom podpoglavlju kroz četiri faze je predstavljen postupak optimizacije statičkih elemenata linije u cilju povećanja otpornosti sistema na poremećaj (Slika 5.6). Optimizacija podrazumeva podelu dijametralne linije na dve radijalne. U strukturi postupka značajnu ulogu ima model širenja poremećaja intervala sleđenja vozila duž linije (poglavlje 4.2). Vrednovanje podele dijametralne linije na dve radijalne se vrši na osnovu:

- povećanja ravnomernosti intervala sleđenja,
- smanjenja prosečnog vremena čekanja putnika na stajalištu,
- vremena presedanja putnika i
- dodatnog vremena boravka putnika u sistemu.

Postupak optimizacije se sastoji iz četiri faze (Slika 5.6):

- I. Podela dijametralne linije,
- II. Simulacija širenja poremećaja intervala sleđenja,
- III. Evaluacija ravnomernosti intervala sleđenja i
- IV. Evaluacija vremena boravka putnika u sistemu.

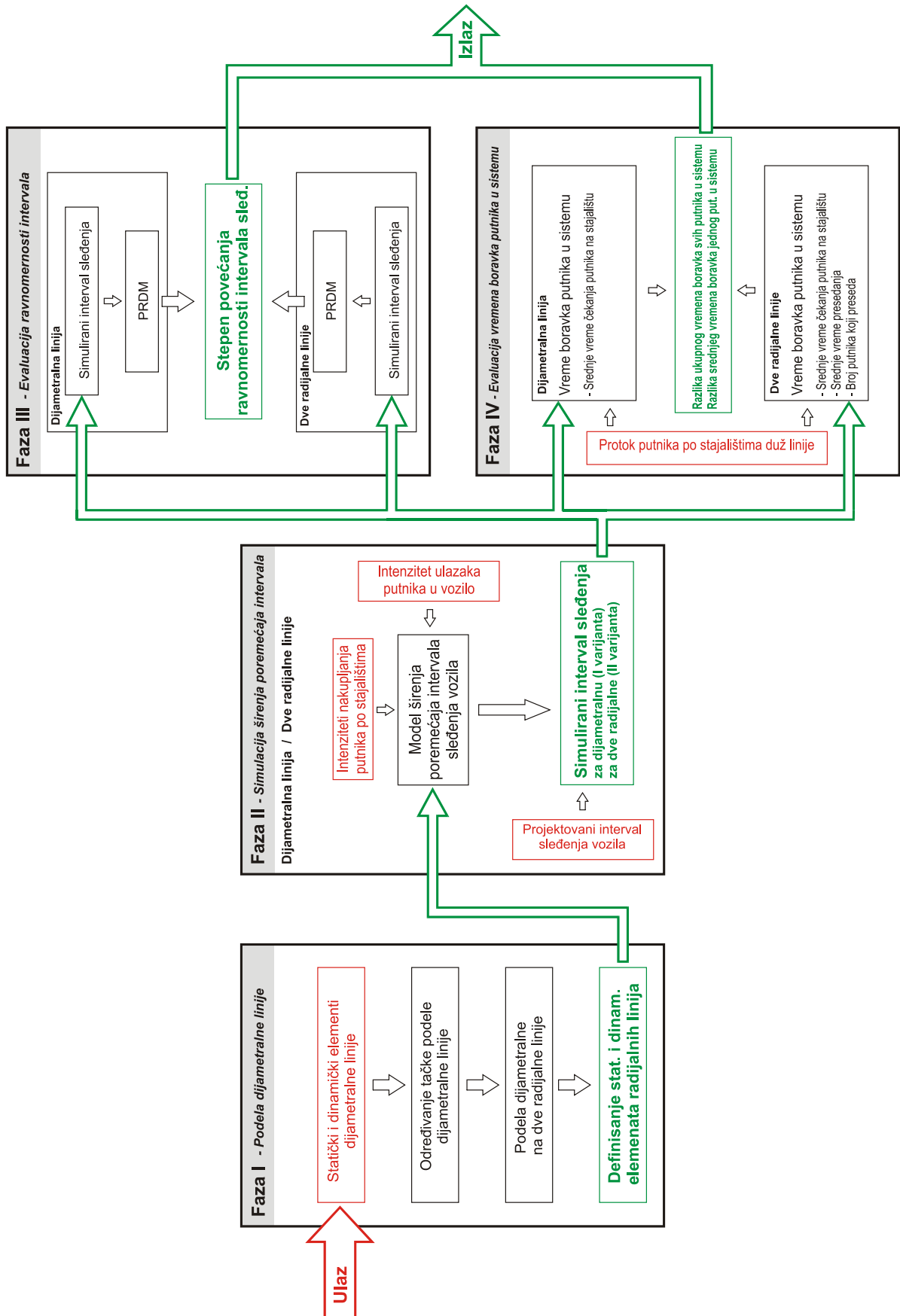
Ulazni parametri za postupak optimizacije podele dijametralne linije na dve radijalne (Slika 5.7) su:

- protok putnika duž linije,
- projektovani interval sleđenja vozila,
- veličina primarnog poremećaja intervala sleđenja,
- broj stajališta na liniji,

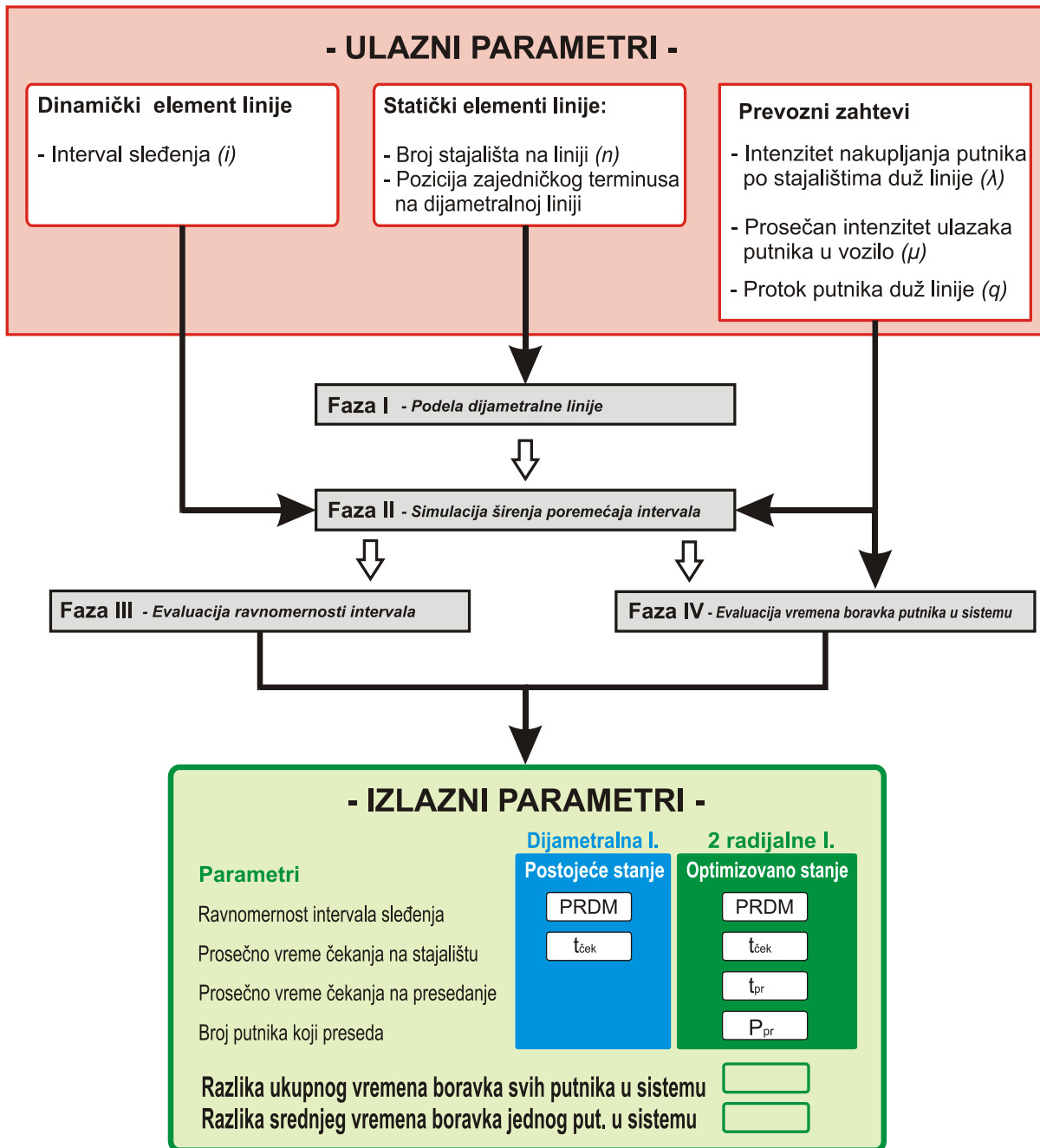
- pozicija terminusa/okretnice na dijametralnoj liniji u užem gradskom jezgru ili stajalište koje u skladu sa prostorno-tehničkim uslovima omogućava formiranje terminusa/okretnice,
- intenzitet nakupljanja putnika po stajalištima duž linije,
- prosečan intenzitet ulaska putnika u vozilo.

Izlazni rezultati postupka optimizacije predstavljaju izlaz iz III faze i IV faze (Slika 5.7), a to su:

- postignuta ravnomernost intervala sleđenja (PRDM),
- srednje vreme čekanja putnika na stajalištu za obe varijante,
- srednje vreme presedanja putnika,
- razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu prve i druge varijante.



Slika 5.6 Prikaz postupka optimizacije po fazama



Slika 5.7 Prikaz ulaznih i izlaznih parametara u postupku optimizacije

### 5.3.1 Prva faza - Podela dijametralne linije

U prvoj fazi vrši se podela dijametralne linije AB na dve radijalne linije (AC i CB). Tačka podele predstavlja terminus/okretnicu u užem gradskom jezgru (C) ili stajalište koje u skladu sa prostorno-tehničkim uslovim omogućava formiranje terminusa/okretnice. Novonastale radijalne linije imaju isti interval sleđenja i kapacitet linije kao i dijametralna linija (AB). Ostali dinamički elementi radijalnih linija utvrđuju se u skladu sa statičkim elementima, zahtevanim intervalom i kapacitetom linije.

Opisanim postupkom formiraju se dve varijante. Prva varijanta predstavlja postojeći način funkcionisanja sa jednom dijametralnom linijom (AB). Kod druge varijante prevoz se vrši pomoću dve radijalne linije (AC i CB).

Izlaz iz prve faze postupka optimizacije predstavljaju definisani statički i dinamički elementi linija, za prvu i drugu varijantu posebno.

### **5.3.2 Druga faza - Simulacija širenja poremećaja intervala sleđenja**

U drugoj fazi, za obe varijante, modelom širenja poremećaja (poglavlje 4.2) simulira se kumuliranje poremećaja intervala sleđenja vozila duž linije. Simulacija se vrši na osnovu sledećih parametara:

- utvrđenih karakteristika kretanja putnika na postojećoj dijametralnoj liniji,
- projektovanog intervala sleđenja vozila,
- utvrđenog intenziteta ulazaka putnika i
- pretpostavljenih primarnih poremećaja intervala sleđenja.

Polasci vozila radijalnih linija sa zajedničkog terminusa nisu koordinisani. Kumuliranje poremećaja intervala sleđenja na prvoj radijalnoj liniji prekida se dolaskom vozila na zajednički terminus. Vozilo sa druge radijalne linije započinje poluoobrta bez uticaja poremećaja koji se dogodio na prvoj radijalnoj liniji. U postupku simulacije za obe varijante organizacije prevoza formiraju se isti uslovi za kumuliranje poremećaja, uključujući između ostalog i iste vrednosti primarnog poremećaja intervala sleđenja.

Za slučaj postojanja poremećaja u sistemu, simulirane vrednosti intervala sleđenja po stajalištima duž linije dobijaju se na osnovu projektovanog intervala sleđenja i simuliranog poremećaja intervala vozila. Izlaz iz druge faze predstavljaju simulirani intervali sleđenja po stajalištima duž linije za obe varijante prevoza.

### **5.3.3 Treća faza - Evaluacija ravnomernosti intervala sleđenja**

U trećoj fazi, za obe varijante, vrši se vrednovanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila. Za proračun stepena ravnomernosti intervala sleđenja vozila po stajalištima duž linije koristi se procenat pravilnosti devijacije intervala sleđenja (PRDM), jednačina (3.9). Izlaz iz treće faze predstavlja postignuta ravnomernost intervala sleđenja za obe varijante definisana parametrom PRDM.

### **5.3.4 Četvrta faza - Evaluacija vremena boravka putnika u sistemu**

U četvrtoj fazi, na osnovu prethodno utvrđenih statičkih i dinamičkih elemenata linije (prve i druge varijante), karakteristika kretanja putnika na liniji i simuliranog poremećaja intervala sleđenja, vrši se evaluacija vremena boravka putnika u sistemu na osnovu:

- srednjeg vremena čekanja putnika na stajalištu,
- srednjeg vremena presedanja putnika,
- srednjeg vremena boravka putnika u sistemu.

#### Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu

U skladu sa ograničenjem modela ( $i < 15 \text{ min}$ ), prosečno vreme čekanja putnika na stajalištu u uslovima postojanja poremećaja intervala sleđenja vozila na liniji, utvrđuje se jednačinom (5.3). Vreme čekanja putnika na stajalištu između ostalog zavisi i od poremećaja intervala sleđenja vozila. Varijacije u poremećaju intervala sleđenja po stajalištima duž linije utiču na varijacije prosečnog vremena čekanja putnika po stajalištima duž linije. Najmanje vrednosti prosečnog vremena čekanja putnika su na prvim stajalištima duž linije (posmatrano od početnog terminusa u poluobrtu), dok su najveća na poslednjim stajalištima u poluobrtu. Varijacije prosečnog vremena čekanja putnika po stajalištima duž linije su posledica kumuliranja poremećaja intervala sleđenja vozila. Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu za potrebe evaluacije u ovom postupku se utvrđuje kao aritmetička sredina prosečnog vremena čekanja svih putnika na liniji, jednačina (5.14).

$$t_{ček}^{sr} = \frac{\sum t_{ček}}{P}, \text{ [min]} \quad (5.14)$$

gde je:

- $t_{ček}^{sr}$  – srednje vreme čekanja svih putnika na stajalištu,
- $t_{ček}$  – prosečno vreme čekanja putnika na stajalištu,
- $P$  – ukupan broj prevezenih putnika.

Kada se uzmu u obzir varijacije poremećaja intervala sleđenja vozila po stajalištima duž linije i činjenica da poremećaj intervala sleđenja utiče na vreme čekanja putnika (jednačina (5.14)) i na broj nakupljenih putnika na stajalištu (jednačina (4.3)), srednje vreme čekanja putnika na liniji se definiše jednačinom (5.15).

$$t_{ček}^{sr} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{i+h_j}{2} (\lambda_j (i+h_j))}{\sum_{j=1}^n \lambda_j (i+h_j)}, \text{ [min]} \quad (5.15)$$

gde je:

- $t_{ček}^{sr}$  – srednje vreme čekanja svih putnika na stajalištu,
- $n$  – broj stajališta na liniji,
- $i$  – projektovani interval sleđenja vozila,
- $h_j$  – poremećaj intervala sleđenja na stajalištu „j“,
- $\lambda_j$  – intenzitet nakupljanja putnika na stajalištu „j“,



Evaluacija srednjeg vremena čekanja putnika na stajalištu vrši se upoređivanjem srednjeg vremena čekanja putnika na stajalištu dve varijante, za postojeći i optimizovan način organizacije.

### Srednje vreme presedanja putnika

Kao što je opisano i definisano u poglavlju 5.2.1, a u skladu sa uslovima i ograničenjima postupka optimizacije, srednje vreme presedanja putnika zavisi isključivo od intervala sleđenja i poremećaja pri polasku vozila sa terminusa druge radijalne linije. Presedanje putnika je negativan proizvod podele dijametralne linije i računa se samo za drugu varijantu (optimizovan način organizacije).

### Srednje vreme boravka putnika u sistemu

Za potrebe evaluacije optimizovane varijante, srednje vreme boravka putnika u sistemu vrednuje se razlikom vrednosti prve varijante i druge varijante. Utvrđivanje razlike srednjeg vremena boravka putnika u sistemu obuhvata četiri koraka:

1. utvrđivanje ukupnog vremena boravka svih putnika na dijametralnoj liniji (prva varijanta),
2. utvrđivanje ukupnog vremena boravka svih putnika na radijalnoj liniji (druga varijanta),
3. utvrđivanje razlike ukupnog vremena boravka svih putnika prve i druge varijante i
4. proračun razlike srednjeg vremena boravka putnika u sistemu.

Proračun ukupnog vremena boravka svih putnika na liniji vrše se analogno proračunima za jednog putnika, predstavljenim u poglavlju 5.2.2. Za prvu varijantu, kada se prevoz realizuje sa dijametralnom linijom, u skladu sa jednačinom (5.9) i jednačinom (5.10), ukupno vreme boravka svih putnika u sistemu na liniji AB se definiše jednačinom (5.16).

$$T_D = \sum_{j=1}^{n-1} \left( \frac{(i+h_j)^2}{2} \lambda_j \right) + \sum_{j=2}^{n-1} \left( \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) (i+h_j) q_{j-1} \right) + \sum_{j=1}^{n-1} t_{vj} \cdot q_j \quad [\text{min}] \quad (5.16)$$

U skladu sa jednačinom (5.11) i jednačinom (5.12), kada se prevoz realizuje sa dve radijalne linije (druga varijanta), ukupno vreme boravka svih putnika u sistemu na liniji AB se definiše jednačinom (5.17).

$$T_{2R} = \sum_{j=1}^{l-1} \left( \frac{(i+h_j)^2}{2} \lambda_j \right) + \sum_{j=2}^{l-1} \left( \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) (i+h_j) q_{j-1} \right) + \sum_{j=1}^{l-1} t_{vj} \cdot q_j + \frac{i}{2} (\lambda_l (i+h_l) + q_l) + \sum_{j=l+1}^{n-1} \left( \frac{(i+h'_j)^2}{2} \lambda_j \right) + \sum_{j=l+1}^{n-1} \left( \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) (i+h'_j) q_{j-1} \right) + \sum_{j=l}^{n-1} t_{vj} \cdot q_j \quad (5.17)$$

Razlika vremena boravka putnika u sistemu prve i druge varijante ( $T_{D-2R} = T_D - T_{2R}$ ) se dobija oduzimanjem jednačine (5.16) od jednačine (5.17).

$$\begin{aligned}
 T_{D-2R} = & \sum_{j=l}^{n-1} \left( \frac{(i+h_j)^2}{2} \lambda_j \right) + \sum_{j=l}^{n-1} \left( \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) (i+h_j) q_{j-1} \right) - \\
 & - \sum_{j=l+1}^{n-1} \left( \frac{(i+h'_j)^2}{2} \lambda_j \right) - \sum_{j=l+1}^{n-1} \left( \left( \frac{\lambda_j}{\mu} \right) (i+h'_j) q_{j-1} \right) - \frac{i}{2} ((i+h_l) \lambda_l + q_l) , \quad [\text{min}]
 \end{aligned} \tag{5.18}$$

Gde je:

- $T_D$  – vreme koje svi putnici provedu u sistemu JGPP-a koristeći dijametralnu liniju,
- $T_{2R}$  – vreme koje svi putnici provedu u sistemu JGPP-a koristeći dve radijalne linije,
- $\lambda_j$  – intenzitet nakupljanja putnika na stajalištu „j“,
- $\mu$  – Intenzitet ulazaka putnika u vozilo,
- $h_j$  – poremećaj intervala sleđenja vozila na stajalištu „j“,
- $h'_j$  – poremećaj intervala sleđenja vozila na stajalištu „j“ za drugu radijalnu liniju,
- $i$  – projektovani interval sleđenja vozila na liniji.

Srednje vreme boravka jednog putnika u sistemu predstavlja aritmetičku sredinu boravka svih putnika u sistemu, a dobija se kao količnik ukupnog vremena boravka svih putnika u sistemu i ukupnog broja prevezenih putnika.

$$T_{pus_{sr}} = \frac{\sum_{i=1}^P T_{pus_i}}{P} , \quad [\text{min}] \tag{5.19}$$

## 6 ISTRAŽIVANJE KARAKTERISTIKA SISTEMA JAVNOG GRADSKOG PREVOZA PUTNIKA

Istraživanje karakteristika sistema JGPP-a podstaknuto je potrebom za testiranjem praktične primene postupka optimizacije na podacima realnih linija JGPP-a. Za područje istraživanja izabran je grad Novi Sad i postojeći sistem JGPP-a, koji se zasniva na autobuskom podsistemu. U prethodnom poglavlju, u okviru postupka optimizacije statičkih elemenata linije definisani su ulazni parametri. U skladu sa definisanim ulaznim parametrima postupka optimizacije, tokom istraživanja prikupljeni su:

- podaci o statičkim elementima linija (dužina linije, broj stajališta po smerovima, terminusi)
- podaci o projektovanim dinamičkim elementima linija (vreme obrta, broj vozila na radu, interval sleđenja, frekvencija vozila)
- podaci o karakteristikama kretanja putnika duž linije (ulasci putnika, izlasci putnika, protok putnika)
- podaci o realizovanim dinamičkim elementima linija (vreme obrta, interval sleđenja, frekvencija vozila)
- podaci o intenzitetu ulazaka putnika u vozilo.

Prikupljanje neophodnih podataka podrazumevalo je sledeća istraživanja:

- Utvrđivanje projektovanih statičkih i dinamičkih elemenata sistema – podaci su preuzeti od institucije zadužene za upravljanje i organizovanje sistema JGPP-a - Javnog gradskog saobraćajnog preduzeća – Novi Sad,
- Utvrđivanje karakteristika kretanja putnika duž linije i karakteristika realizovanih dinamičkih elemenata linija – korišćeni su podaci iz studije „Sistemska-generalno brojanje i anketa putnika u javnom gradskom i prigradskom prevozu putnika na području Novog Sada“
- Utvrđivanje intenziteta ulazaka putnika u vozilo – izvršeno je spostveno istraživanje.

## 6.1 PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Novi Sad se nalazi na  $45^{\circ}20'0''$  severne geografske širine i  $19^{\circ}51'0''$  istočne geografske dužine, u središnjem delu autonomne pokrajine Vojvodine, na severu Srbije, na granici Bačke i Srema. Grad leži na obalama reke Dunav, između 1.252-og i 1.262-og kilometra rečnog toka. Na levoj obali Dunava se nalazi ravničarski deo grada, dok je na desnoj obali, na obroncima Fruške gore, smešten brdoviti deo grada. Nadmorska visina sa bačke strane je od 72 do 80 m, dok sa sremske strane iznosi do 250 metara. Čine ga tri jedinice lokalne samouprave: opštine Novi Sad, Sremska Kamenica i Petrovaradin, koje sve zajedno obuhvataju površinu od  $129,4 \text{ km}^2$ . Prema poslednjim rezultatima popisa stanovništva iz 2011. god., na teritoriji Grada Novog Sada je živelo 341.625 stanovnika.

U Novom Sadu javni gradski prevoz putnika se realizuje autobuskim podsystemom, koji je organizovan kao linijski. Mrežu čini 17 gradskih linija (slika 8.1). Ukupna dužina gradskih linija iznosi oko 260 kilometara (oba smera). Najkraća linija je Linija broj 16 Železnička stanica-Pristanište i iznosi 3,7 km, a najduža je kružna linija broj 7 i ona iznosi 12,1 km. Na mreži gradskih linija u Novom Sadu, presečna međustanična rastojanja se kreću od 372 m na linija broj 8, do 575m na liniji broj 15, a prosečno međustanično rastojanje za celu mrežu iznosi 458 m.



Slika 6.1 Prilaz mreže gradskih linija u Novom Sadu

Ako se izuzmu linije koje povezuju pojedine delove grada sa industrijskim zonama, prosečan interval sleđenja na gradskim linijama u vršnom periodu iznosi oko 10 minuta, a u van vršnom periodu oko 13 minuta. U vršnom periodu najmanji interval sleđenja je na linijama broj 1 Klisa - Centar - Liman I i broj 5 Temerinski put - Centar - Avijatičarsko naselje i iznosi 7,6 minuta. U vanvršnom periodu najmanji interval sleđenja je na liniji 3 Petrovaradin - Centar – Detelinara. Najveći intervali sleđenja vozila su na liniji broj 14 Centar – Sajlovo i iznose 20 minuta za oba perioda.

Tabela 6.1 Statički i dinamički elementi linija u sistemu JGPP-a u Novom Sadu

	Tip trase	Dužina (m)		Broj stajališta		Interval (min)		
		Smer A	Smer B	Smer A	Smer B	Vršni period	Vanvršni period	
1	Klisa–Centar–Liman I	Dijametralna	8650	7800	18	18	7,6	12
2	Centar–Novo naselje	Radijalna	4900	5000	13	12	8,8	11
3	Petrovaradin–Centar–Detelinara	Dijametralna	9050	8700	19	20	8,3	10
4	Liman IV–Centar–Žel.stanica	Dijametralna	5500	5650	12	12	9	10,8
5	Temerinski put–Centar–Avijatičar. n.	Dijametralna	9950	10100	23	24	7,6	10,3
6	Podbara–Adice	Radijalna	9450	9350	22	20	11,7	14
7	N.naselje–Ž.stanica–Liman –N.nas.	Kružna	12680	12180	26	27	8,3	11,5
8	Novo naselje–Centar–Liman I	Dijametralna	8550	8550	23	20	8	10,8
9	Petrovaradin–Liman–Novo naselje	Dijametralna	10900	10900	24	25	9,3	11,4
10	Centar–Industrijska zona jug	Radijalna	6050	6100	12	13	-	-
11	Ž.stanica–Liman–Bolnica–Ž.stanica	Kružna	11400	11400	23	24	11	11
12	Centar–Telep	Radijalna	8050	7850	21	20	10,3	13,6
13	Univerzitet–Grbavica–Detelinara	Tangencijalna	6800	6800	15	16	15	20
14	Centar–Sajlovo	Radijalna	6900	7700	16	15	20	20
15	Centar–Industrijska zona sever	Radijalna	7400	8050	14	14	-	-
16	Železnička stanica–Pristanišna zona	Periferna	4150	3700	8	7	-	-
17	Big centar–Centar- Ž.stanica–Big c.	Kružna	7100	-	14	-	35	-

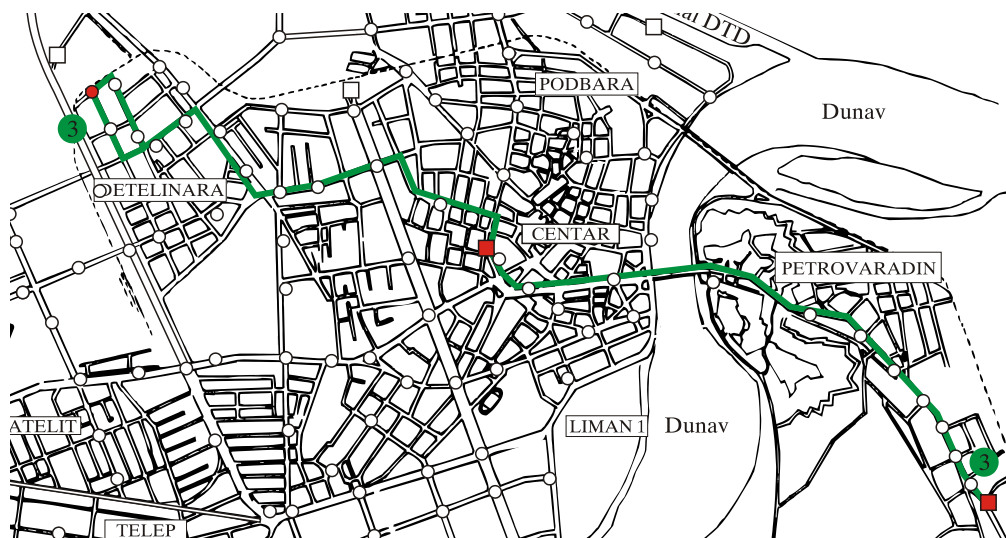
Postupak optimizacije statičkih elemenata linije u cilju povećanja otpornosti sistema na poremećaj intervala sleđenja se odnosi na dijametralne linije, pri čemu se najveći efekti optimizacije očekuju na linijama sa većim brojem stajališta i manjim intervalima sleđenja. Jedan od uslova podele dijametralne linije na dve radijalne je da trasa postojeće linije prolazi kroz terminus u centru grada. Za primenu postupka optimizacije na realnim podacima kao reprezentativne linije su izabrane linija broj 3 Petrovaradin–Centar–Detelinara i linija broj 5 Temerinski put–Centar–Avijatičarsko naselje.

## 6.2 PROJEKTOVANI ELEMENTI LINIJA

Projektovani statički i dinamički elemenati linije broj 3 i linije broj 5 utvrđeni su na osnovu daljinara, turažnih tablica i reda vožnje za gradski saobraćaj. Podaci su preuzeti od institucije zadužene za upravljanje i organizaciju sistema JGPP-a u Novom Sadu, odnosno od Javnog gradskog saobraćajnog preduzeća – Novi Sad.

### 6.2.1 Statički elementi linija

Linija broj 3 Petrovaradin–Centar–Detelinara prema načinu pružanja trase svrstava se u dijametralne linije. Linija broj 3 povezuje naselja Detelinara i Petrovaradin, pri čemu trasa prolazi kroz uže gradsko jezgro. Projektovana dužina linije u smeru A iznosi 9,05 km, a u smeru B 8,7 km, tako da ukupna dužina jednog obrta iznosi 17,75 km.



Slika 6.2 Prikaz trase linije broj 3 Petrovaradin–Centar–Detelinara

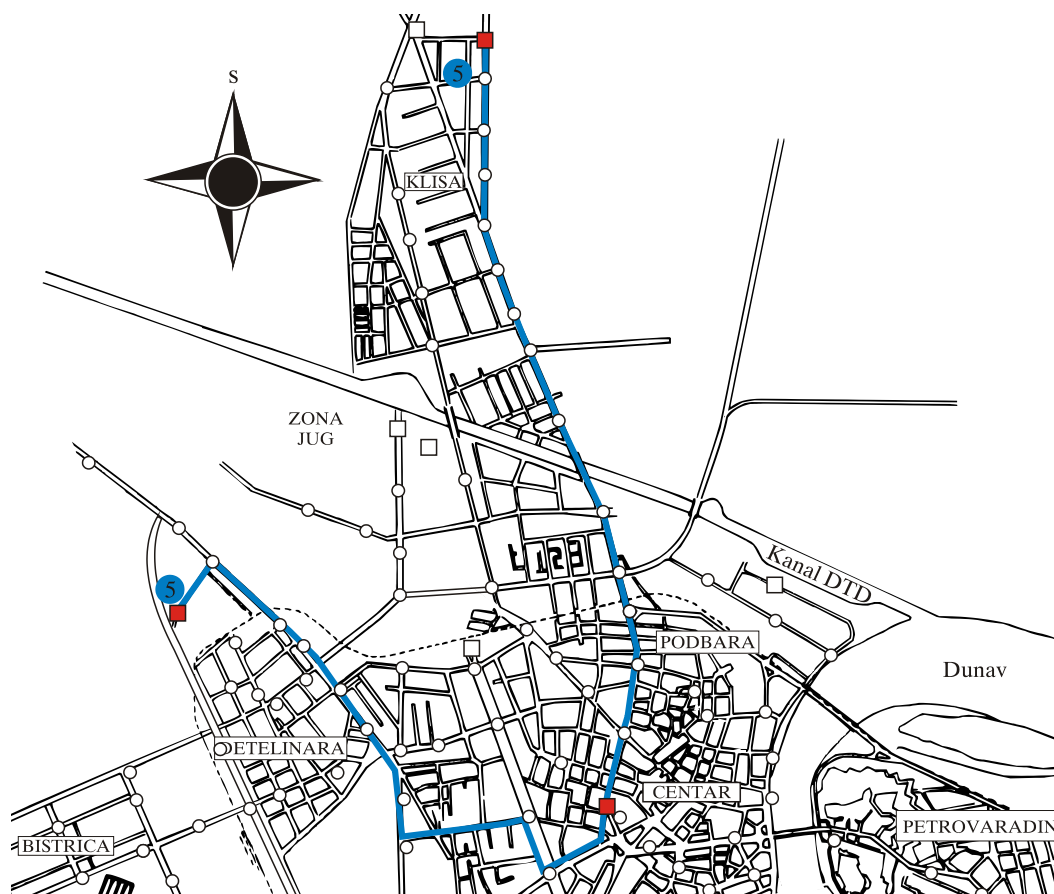
U smeru A linija ima 19 stajališta sa prosečnim međustaničnim rastojanjem od 476 m, pri čemu najkraće međustanično rastojanje iznosi 300m, a najduže 800m. U smeru B linija ima 20 stajališta sa prosečnim međustaničnim rastojanjem od 375 m, pri čemu najkraće međustanično rastojanje iznosi 300m, a najduže 700m.

Tabela 6.2 Statički elementi linije broj 3

Smer A					Smer B				
r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase	r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase
1	0610OK	Petrovaradin – Okretnica	0	0	1	0226BKT	Janka Čmelika I	0	0
2	0611B	Petrovaradin – Žel. stanica	500	500	2	0227B	Janka Čmelika II – Škola	300	300
3	0612B	Preradovićeva – Božidar Adžije	600	1100	3	0228B	Kornelija Stankovića III – Pilot	300	600
4	0613B	Preradovićeva – M.Oreškovića	350	1450	4	0217B	Rumenačka – Kor. Stankovića	500	1100
5	0615B	Preradovićeva – Benzin. pumpa	450	1900	5	0218B	Rumenačka – ABC Samoposluga	500	1600
6	0616B	Preradovićeva – Šenoina	300	2200	6	0219B	Kralja Petra I – Sajam	300	1900
7	0617B	Preradovićeva – Lovački dom	400	2600	7	0220B	Kralja Petra I – Mašinska škola	300	2200
8	0618B	Beogradska – Vladimira Nazora	600	3200	8	0221B	Kralja Petra I – Bul. Oslobođenja	400	2600
9	06 9B	Bul.Mih. Pupina – Dunavski park	800	4000	9	0222B	Vojvode Bojović – Socijalno	500	3100
10	0620B	Bul.Mihajla Pupina – rk"bazar"	700	4700	10	0127BT1	Uspenska – Šafarikova	700	3800
11	0102AT1	Uspenska – SNP	300	5000	11	060 A	Bul.Mihajla Pupina – Pothodnik	300	4100
12	0201A	Vojvode Bojović – Socialno	700	5700	12	0602A	Bul.Mihajla Pupina – Radnički dom	700	4800
13	0202A	Kralja Petra I – Tunel jeftinoće	650	6350	13	0603A	Beogradska – Vladimira Nazora	700	5500
14	0203A	Kralja Petra I – Groblje	400	6750	14	0604A	Preradovićeva – Lovački dom	600	6100
15	0204A	Rumenačka – Apoteka	500	7250	15	0605A	Preradovićeva – Osnovna škola	400	6500
16	0205A	Rumenačka – Bul.Jaše Tomića	400	7650	16	0606A	Preradovićeva – Reljkovićeva	500	7000
17	0223A	K.Stankovića I – Čika Stevina	300	7950	17	0607A	Preradovićeva – Marina Držića	500	7500
18	0225A	Milenka Grčića – rk"detelinara"	600	8550	18	0608A	Preradovićeva – Franje Malina	500	8000
19	0226BKT	Janka Čmelika I	500	9050	19	0609A	Petrovaradin – Železnička stanica	300	8300
					20	0610OK	Petrovaradin – Okretnica	400	8700

Kada se linija posmatra u smeru A prvo stajalište u Petrovaradinu je izvedeno kao okretnica, dok je poslednje stajalište u naselju Detelinara izvedeno kao standardno stajalište. Deo trase linije 3 u naselju Detelinara je kružnog tipa i omogućava promenu smera vozila. Trasa linije 3 u užem gradsko jezgru koristi stajalište Uspenska – Šafarikova (Šifra: 0102AT1 / 0127BT1) koje je izvedeno kao terminus. U postojećem načinu organizacije mreže linija u Novom Sadu stajalište Uspenska – Šafarikova koristi se kao početno stajalište/terminus za većinu gradskih radijalnih linija. Na liniji 3 u smeru A, stajalište Uspenska – Šafarikova je po redu jedanaesto od dvadeset stajališta, a u smeru B je deseto od dvadeset stajališta.

Linija broj 5 Temerinski put–Centar–Avijatičarsko naselje prema načinu pružanja trase se svrstava u dijametralne linije. Linija broj 5 povezuje naselja Klisa i Avijatičarsko naselje, pri čemu trasa prolazi kroz uže gradsko jezgro. Projektova dužina linije u smeru A iznosi 9,95 km, a u smeru B 10,1 km, tako da ukupna dužina jednog obrta iznosi 20,05 km.



Slika 6.3 Prikaz trase linije broj 5 Temerinski put–Centar–Avijatičarsko

U smeru A linija ima 23 stajališta sa prosečnim međustaničnim rastojanjem od 433 m, pri čemu najkraće međustanično rastojanje iznosi 250 m, a najduže 850 m. U smeru B linija ima 24 stajališta sa prosečnim međustaničnim rastojanjem od 421 m, pri čemu najkraće međustanično rastojanje iznosi 200m, a najduže 900m.

Tabela 6.3 Statički elementi linije broj 5

Smer A					Smer B				
r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase	r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase
1	0143OK	Temerinski put – OK "Rodić"	0	0	1	0209OK	Avijatičarska – Kasarna	0	0
2	0144B	Temerinski put – Savska	400	400	2	0215B	Rumenački put – Jastreb	600	600
3	0145B	Temerinski put – Velebitska	300	700	3	0216B	Rumenačka – Benzinska pumpa	450	1050
4	014 B	Temerinski put – A.Varađanina	300	1000	4	0217B	Rumenačka – K.Stankovića	500	1550
5	0147B	Temerinski put – Stovarište bor	300	1300	5	0218B	Rumenačka - ABC samoposluga	400	1950
6	0148B	Temerinski put – O.Keršovanija	300	1600	6	0707A	Hajduk Veljkova - Sajam	500	2450
7	0149B	Temerinska – Najlon pijaca	700	2300	7	0707A/1	Novosadskog sajma Bazeni	400	2850
8	0150B	Temerinska – Vidovdansko n.	300	2600	8	0707A/2	Novosadskog sajma - Osnovna šk.	400	3250
9	0151B	Temerinska – Ša kaška	850	3450	9	0510A	Bul.Oslobođenja Novosadskog s.	400	3650
10	0152B	Temerinska – Partizanska	400	3850	10	0337B	Jevrejska – Futoška pijaca	400	4050
11	0153B	Temerinska – Koste Šokice	250	4100	11	0103AT1	<b>Uspenska – SNP</b>	<b>550</b>	<b>4600</b>
12	0154B	Temerinska – Pijaca	550	4650	12	0131A	Temerinska – Trg Marije Trandafil	600	5200
13	0126BT1	<b>Uspenska – Šafarikova</b>	<b>750</b>	<b>5400</b>	1	0132A	Temerinska – Gundulićeva	350	5550
14	0536B	Bul.Oslobođenja – Futoška pijaca	650	6050	14	0133A	Temerinska – Patr. Čarnojević	300	5850
15	0707B/2	Novosadskog s. – Bul.Oslobođenja	400	6450	15	0134A	Temerinska – Autovojvodina	450	6300
16	0707B/1	Novosadskog s. – Osnovna škola	300	6750	16	0135A	Temerinska – Šajkaška	200	6500
17	0722B	Hajduk Veljkova – Novosadskog s.	500	7250	17	0136A	Temerinska – Vidovdansko naselje	900	7400
18	0204A	Rumenačka – Apoteka	700	7950	18	0137A	Temerinska – Naj on pijaca	400	7800
19	0205A	Rumenačka – Bul.Jaše Tomića	400	8350	19	0138A	Temerinski put – O. Keršovanija	600	8400
20	0206A	Rumenačka – Radničko igralište	400	8750	20	0139A	Temerinski put – Stovarište Bor	250	8650
21	0207A	Rumenački put – Benzinska p.	300	9050	21	0140A	Temerinski put – A. Varađanina	300	8950
22	0208A	Avijatičarska – Jastreb	450	9500	22	0141A	Temerinski put – Velebitska	350	9300
23	0209OK	<b>Avijatičarska – Kasarna</b>	<b>450</b>	<b>9950</b>	23	0142A	Temerinski put – Savska	400	9700
					24	0143OK	<b>Temerinski put – OK "Rodić"</b>	<b>400</b>	<b>10100</b>

Prvo i poslednje stajalište na liniji broj 5 je izvedeno kao okretnica. Trasa linije 5 u užem gradskom jezgru koristi stajalište Uspenska – Šafarikova (Šifra: 0102AT1 / 0127BT1) koje je izvedeno kao terminus. Na liniji broj 5 u smeru A, stajalište Uspenska – Šafarikova je po redu trinaesto od dvadeset tri stajališta, a u smeru B je jedanaesto od dvadeset četiri stajališta.

### 6.2.2 Dinamički elementi linija

U sistemu JGPP-a u Novom Sadu dinamički elementi linije u redu vožnje su određeni za tri karakteristična perioda: vršni, vanvršni i noćni. Prema redu vožnje za radni dan jesenjeg reda vožnje prvi polazak na liniji broj 3 je u 4:30 časa. Vreme rada linije je oko 20 časova, odnosno poslednji polazak na liniji broj 3 je u 24:00 časa. Prosečan interval sleđenja u vršnom periodu iznosi 8,3 minuta, u vanvršnom periodu je 10 minuta, a u noćnom 17,5 minuta. Projektovano vreme obrta vozila u vršnom periodu je 74 minuta, dok je u vanvršnom i noćnom periodu projektovan period obrta od 70 minuta. U skladu sa ukupnom dužinom linije dobija se prosečna brzina obrta od 14,4 km/h u vršnom periodu i 15,2km/h u vanvršnom i noćnom periodu. Prema projektovanom redu vožnje potreban broj vozila po karakterističnim periodima iznosi: 10 vozila za vršni period, 6 vozila za vanvršni i 5 vozila za noćni period.

Prema redu vožnje za radni dan jesenjeg reda vožnje prvi polazak na liniji broj 5 je u 4:30 časa. Vreme rada linije je oko 20 časova, odnosno poslednji polazak na liniji broj 5 je u 24:00 časa. Prosečan interval sleđenja u vršnom periodu iznosi 7,6 minuta, u vanvršnom



periodu je 10,3 minuta, a u noćnom 14,6 minuta. Projektovano vreme obrta vozila u vršnom periodu je 76 minuta, dok je u vanvršnom i noćnom periodu projektovan period obrta od 72 minuta. U skladu sa ukupnom dužinom linije dobija se prosečna brzina obrta od 15,8 km/h u vršnom periodu i 16,7 km/h u vanvršnom i noćnom periodu. Prema projektovanom redu vožnje potreban broj vozila po karakterističnim periodima iznosi: 10 vozila za vršni period, 7 vozila za vanvršni i 5 vozila za noćni period.

### **6.3 ISTRAŽIVANJE TRANSPORTNIH ZAHTEVA I REALIZOVANIH DINAMIČKIH ELEMENATA**

Za potrebe praktične primene postupka optimizacije između ostalog su korišćeni i rezultati istraživanja u sistemu JGPP-a u Novom Sadu, koja su sprovedena 2010. godine u cilju stvaranja pouzdane informacione osnove za potrebe taktičkog i strateškog upravljanja sistemom JGPP-a. Istraživanje na svim gradskim linijama je realizovano na dan 19.10.2010. godine. Istraživanje je obuhvatilo sistemsko brojanje i anketu putnika na svim gradskim i prigradskim linijama. Za potrebe praktične primene modela iz navedenog istraživanja biće korišćeni podaci o karakteristikama kretanja putnika duž linije (ulasci putnika, izlasci putnika, protok putnika) i podaci o realizovanim dinamičkim elementima linija (vreme obrta, interval sleđenja, frekvencija vozila).

#### **6.3.1 Metodologija istraživanja**

U okviru istraživanja koje je obuhvatilo brojanje i anketu korisnika sistema javnog prevoza putnika na području Novog Sada, istraživane su karakteristike korisnika i putovanja, transportni zahtevi, ponuda, i kvalitet sistema javnog masovnog prevoza putnika na svim gradskim, prigradskim i međumjesnim linijama na kojima prevoz obavlja gradsko saobraćajno preduzeće Novi Sad (GSP).

Brojanju putnika je prethodila adekvatna priprema kojom su u potpunosti sagledani način organizacije sistema javnog prevoza, broj voznih jedinica koji se angažuje za realizaciju reda vožnje, mesta i vremena polaska svakog vozila prema turažnim tablicama, pauze u radu vozila, itd. Pripremna faza brojanja obuhvatila je samu pripremu brojačkog materijala (fascikle, bedževi, brojački obrasci itd), raspored i obuku brojača, raspored i obuku kontrolora, raspored i obuku kontrolora GSP-a koji su na okretnicama i terminusima preuzimali brojačke obrasce sa svaku liniju posle svakog obrta.

Za svaku od gradskih linija unapred su pripremljeni brojački obrasci sa šifrom i nazivom stajališta koji su preuzeti iz daljinara GSP-a. Raspored brojača izvršen je prema garažnim brojevima vozila za svaku pojedinačnu liniju, u skladu sa rasporedom rada otpravničko-dispečerske službe GSP-a.

Prilikom brojanja bili su angažovani brojači koji su bili raspoređeni u vozila prema unapred definisanom rasporedu. Brojači su vršili evidentiranje ulazaka i izlaza putnika u unapred pripremljene brojačke obrasce. Evidentiranje ulazaka i izlaza putnika vršeno je tako što je na svaka vrata bio raspoređen po jedan brojač koji je na svakom stajalištu beležio izmenu putnika kao i prolazna vremena vozila kroz svako stajalište. Slika 6.4 prikazuje izgled brojačkog obrasca u koji su brojači unosili definisane podatke.

Brojanjem je obuhvaćen 2331 polazak, odnosno 34 polaska nisu izbrojana, a realizovana su. Svi polasci koji su realizovani, a nisu obuhvaćeni brojanjem, simulirani su. Simulacija je izvedena tako što je simuliran broj putnika koji je ušao i izašao iz vozila, na osnovu srednje vrednosti prethodnog i narednog polaska u odnosu na polazak koji nije brojan. Na ovaj način je dobijena potpuno objektivna slika broja realizovanih vožnji putnika, protoka, izmene i sličnih parametara. Na liniji broj 3 je realizovano 215 polazaka i svi su snimljeni, dok na liniji broj 5 je realizovano 225 polazaka, od toga 220 je snimljeno, a 5 polazaka je simulirano.

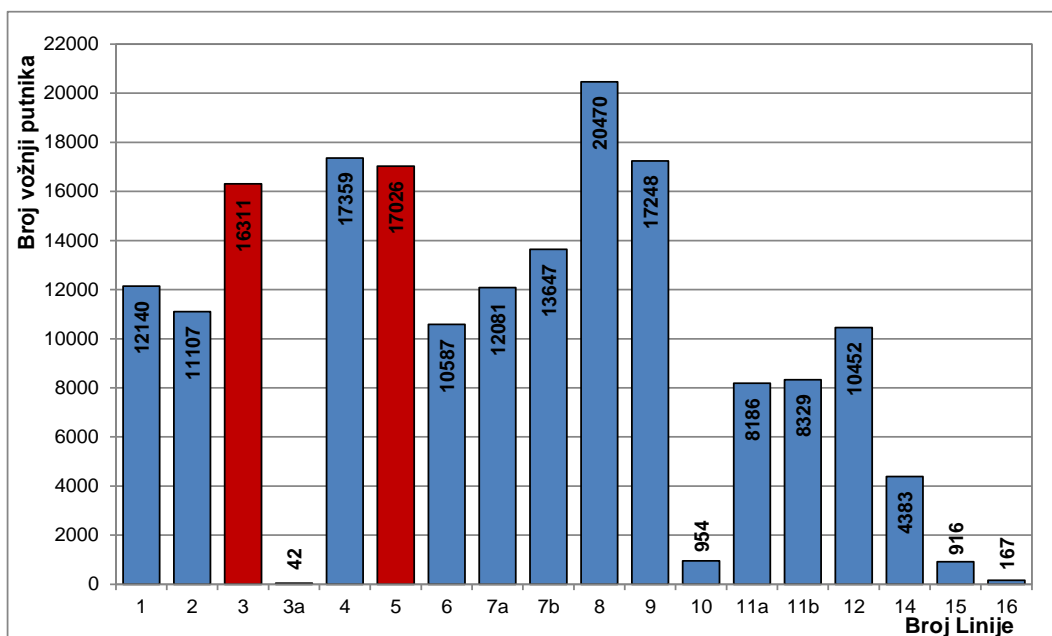
GRAD NOVI SAD		BROJANJE PUTNIKA U JAVNOM PREVOZU NOVOG SADA				FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA, NOVI SAD	
REGISTARSKI BROJ:		GARAŽNI BROJ:		DATUM BROJANJA:		NAZIV LINIJE: <b>CENTAR – NOVO NASELJE</b> 2	
<b>SMER A: CENTAR – NOVO NASELJE</b>		VRATA NA KOJIMA BROJE:		1	2	3	4
R. B.	Šifra stajališta	NAZIV STAJALIŠTA	VREME PROLASKA VOZILA KROZ STAJALIŠTE	BROJ PUTNIKA			
				UŠAO	IZAŠAO		
1	0128BT1	USPENSKA - ŠAFARIKOVA					
2	0301A	FUTOŠKA – FUTOŠKA PIJACA					
3	0302A	FUTOŠKA - KASARNA					
4	0303A	FUTOŠKA – JODNA BANJA					
5	0304A	FUTOŠKA – BOLNICA					
6	0305A	FUTOŠKA – HIGIJENSKI ZAVOD					
7	0307A	FUTOŠKA – JUGOALAT					
8	0307/1A	BUL. S. JOVANOVIĆA – FUTOŠKA					
9	0307/2A	BUL. S. JOVANOVIĆA – DOM ZDRAV.					
10	0321B	BUL. J. DUČIĆA – RK"MLADOST"					
11	0322B	BUL. J. DUČIĆA – BATE BRKIĆA					
12	0323B	BUL. J. DUČIĆA – IGRALIŠTE					
13	0312BKT	NOVO NASELJE – OKRETNICA					
<b>SMER B: NOVO NASELJE – CENTAR</b>		VRATA NA KOJIMA BROJE:		1	2	3	4
R. B.	Šifra stajališta	NAZIV STAJALIŠTA	VREME PROLASKA VOZILA KROZ STAJALIŠTE	BROJ PUTNIKA			
				UŠAO	IZAŠAO		
1	0312BKT	NOVO NASELJE – OKRETNICA					
2	0314A	BUL. J. DUČIĆA – IGRALIŠTE					
3	0315A	BUL. J. DUČIĆA – BATE BRKIĆA					
4	0316B	BUL. J. DUČIĆA – RK"MLADOST"					
5	0317B	BUL. S. JOVANOVIĆA – DOM ZDRAVL.					
6	0332B	FUTOŠKA – VRŠAČKA					
7	0333B	FUTOŠKA – HIGIJENSKI ZAVOD					
8	0334B	FUTOŠKA – CARA DUŠANA					
9	0335B	FUTOŠKA – JODNA BANJA					
10	0336B	FUTOŠKA – ELEKTRO TEHNIČ. ŠKOLA					
11	0337B	JEVREJSKA – FUTOŠKA PIJACA					

Slika 6.4 Izgled brojačkog obrasca

### 6.3.2 Karakteristike transportnih zahteva

Brojanjem putnika u sistemu javnog prevoza na području Novog Sada u jednom radnom danu utvrđene su karakteristike putničkih tokova. Brojanjem je utvrđeno da je na gradskim linijama realizovano ukupno 181405 vožnji putnika. Na liniji broj 3 Petrovaradin–Centar–Detelinara je realizovano 16311 vožnji putnika, što čini 8,99 % ukupnog broja vožnji na gradskom području. Na liniji broj 5 Temerinski put–Centar–Avijatičarsko naselje realizovano je 17026 vožnji putnika, što čini 9,39 % (Slika 6.5).

U narednim tabelama i grafičkim ilustracijama date su osnovne karakteristike putničkih tokova koje su utvrđene istraživanjima. Prikazani su zbirni podaci vezani za realizovani broj vožnji putnika po linijama i broj vožnji putnika po satima u toku dana. Karakteristike kretanja putnika (ulasci putnika, izlasci putnika i protoka putnika) na liniji broj 3 i liniji broj 5 su prikazani po stajalištima i časovima za svaki smer posebno.



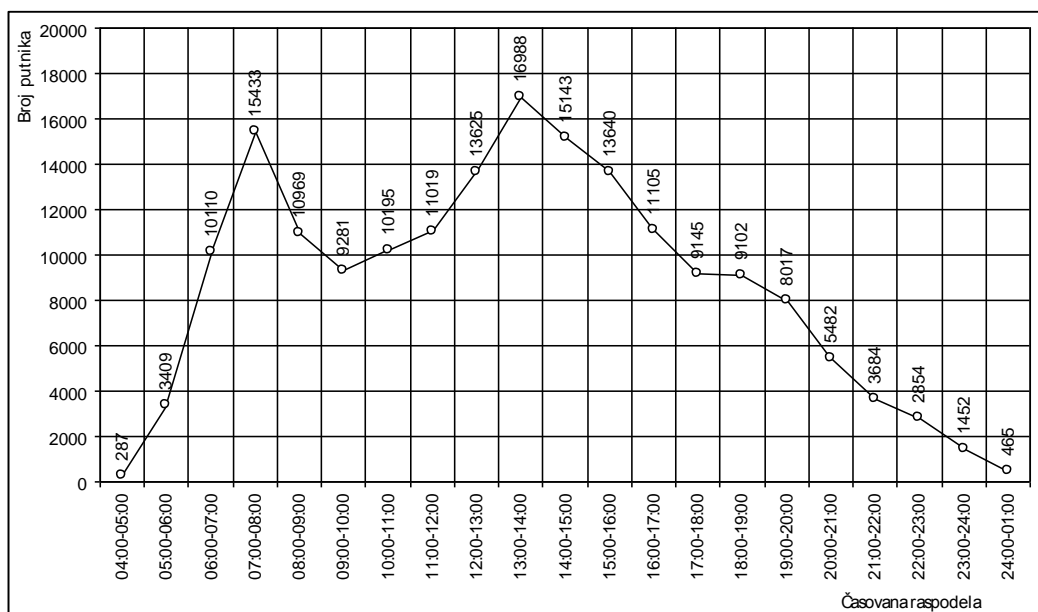
Slika 6.5 Broj vožnji putnika na gradskim linijama – ceo dan –

Časovna raspodela transportnih zahteva obuhvata prikaz ukupnog broja vožnji putnika na gradskim linijama na nivou dana i protoke putnika na nivou dana. Na osnovu analize dobijenih rezultata, zaključuje se da se prepodnevni vršni sat javio u periodu između 07:00 i 08:00 časova kada je na gradskim linijama zahtev za prevozom iznosio 15433 putovanja, dok se poslepodnevni vršni sat javio u periodu između 13:00 i 14:00 časova kada je zahtev za prevozom bio 16988 putovanja. Prepodnevni vršni sat je činio 8,51 % svih dnevnih zahteva za prevozom, a poslepodnevni vršni sat je činio 9,36 % svih dnevnih zahteva za prevozom.

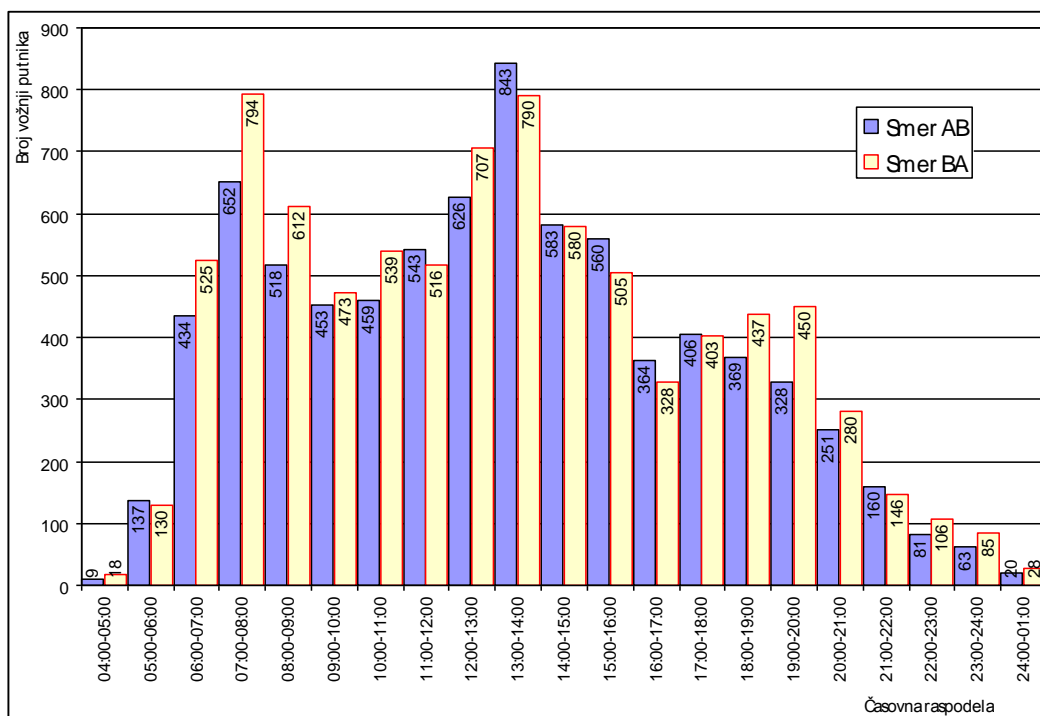
Primena postupka optimizacije na linijama je izvršeno za vršni period od 13:00 do 14:00 časova i za vanvršni period od 9:00 do 10:00

Tabela 6.4 Časovana raspodela broja vožnji putnika na gradskim linijama

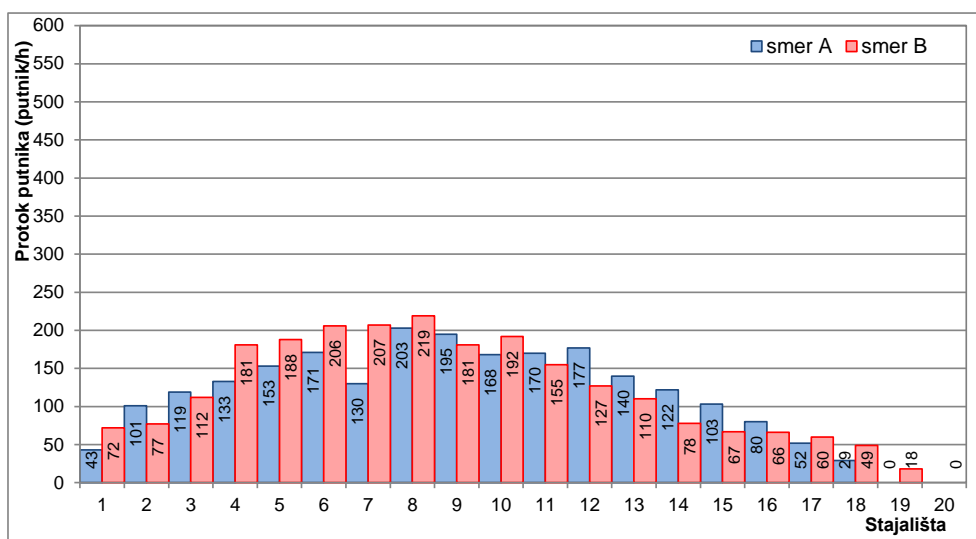
S ati	Vremenska klasa	Broj vožnji putnika	Procenat
1	04:00-05:00	287	0.16
2	05:00-06:00	3409	1.88
3	06:00-07:00	10110	5.57
<b>4</b>	<b>07:00-08:00</b>	<b>15433</b>	<b>8.51</b>
5	08:00-09:00	10969	6.05
6	09:00-10:00	9281	5.12
7	10:00-11:00	10195	5.62
8	11:00-12:00	11019	6.07
9	12:00-13:00	13625	7.51
<b>10</b>	<b>13:00-14:00</b>	<b>16988</b>	<b>9.36</b>
11	14:00-15:00	15143	8.35
12	15:00-16:00	13640	7.52
13	16:00-17:00	11105	6.12
14	17:00-18:00	9145	5.04
15	18:00-19:00	9102	5.02
16	19:00-20:00	8017	4.42
17	20:00-21:00	5482	3.02
18	21:00-22:00	3684	2.03
19	22:00-23:00	2854	1.57
20	23:00-24:00	1452	0.80
21	24:00-01:00	465	0.26
<b>UKUPNO</b>		<b>181405</b>	<b>100</b>



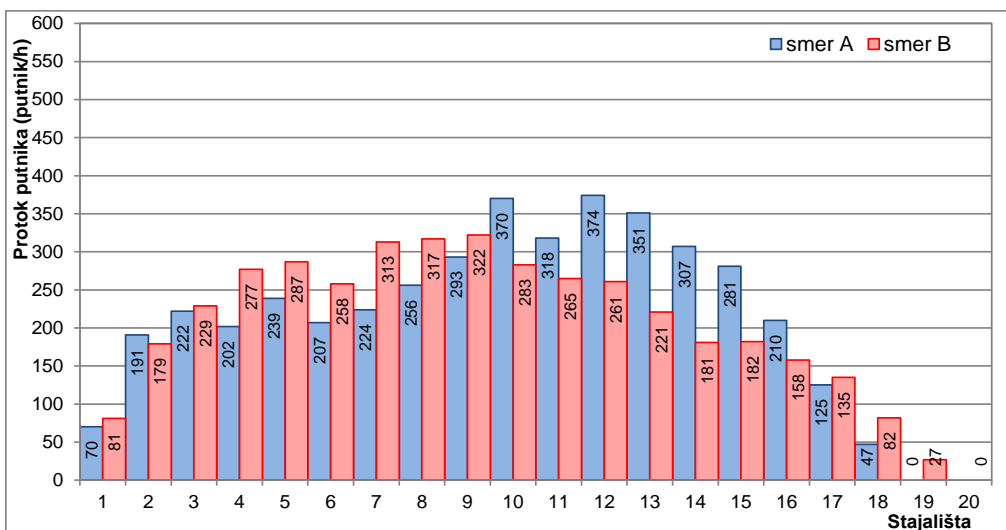
Slika 6.6 Časovna raspodela broja vožnji putnika po časovima u toku dana – gradske linije



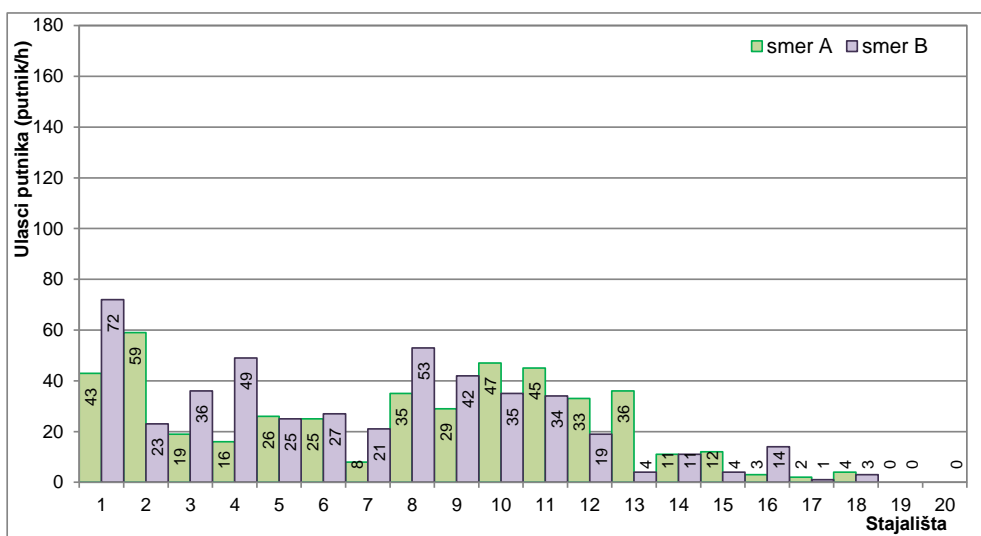
Slika 6.7 Časovna raspodela broja vožnji putnika u toku dana po smerovima na liniji broj 3



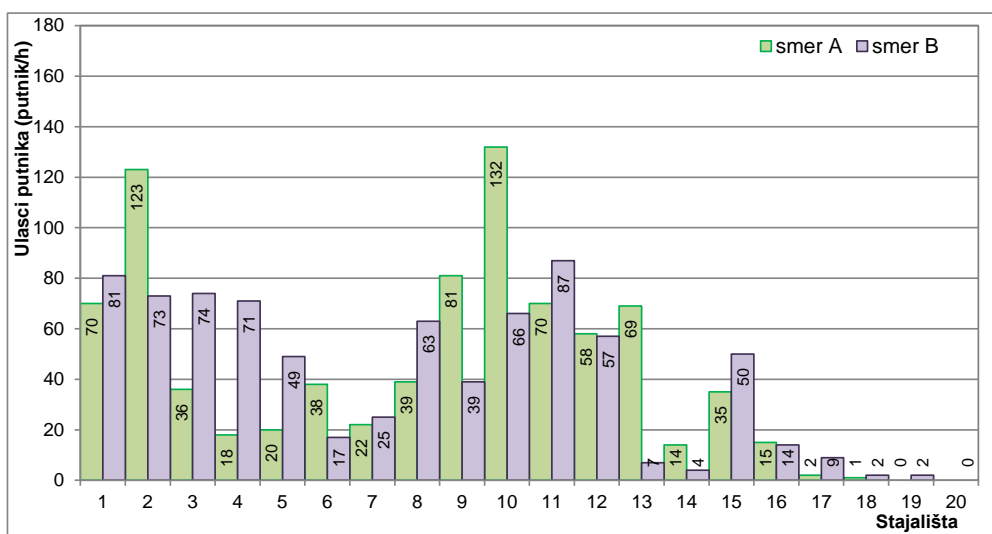
Slika 6.8 Protok putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 3



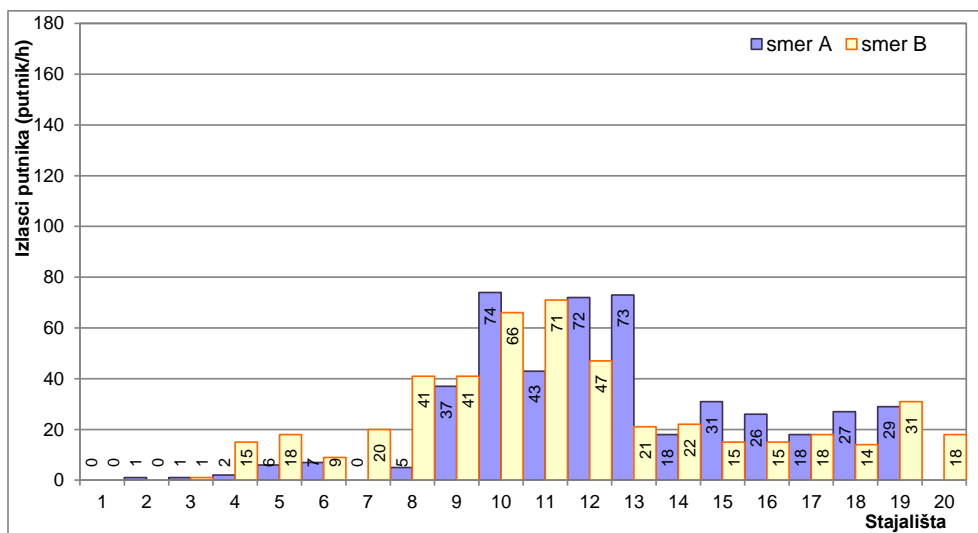
Slika 6.9 Protok putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 3



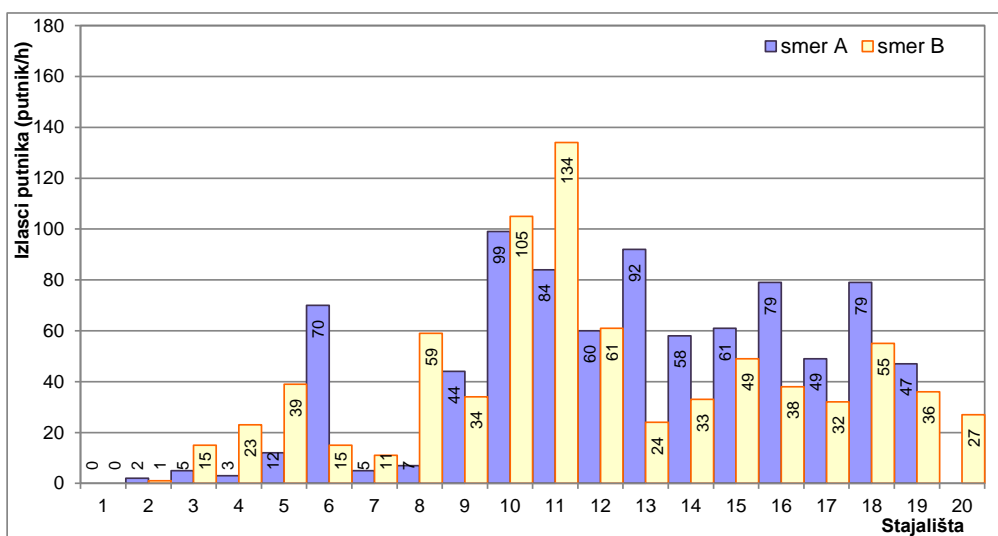
Slika 6.10 Ulasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 3



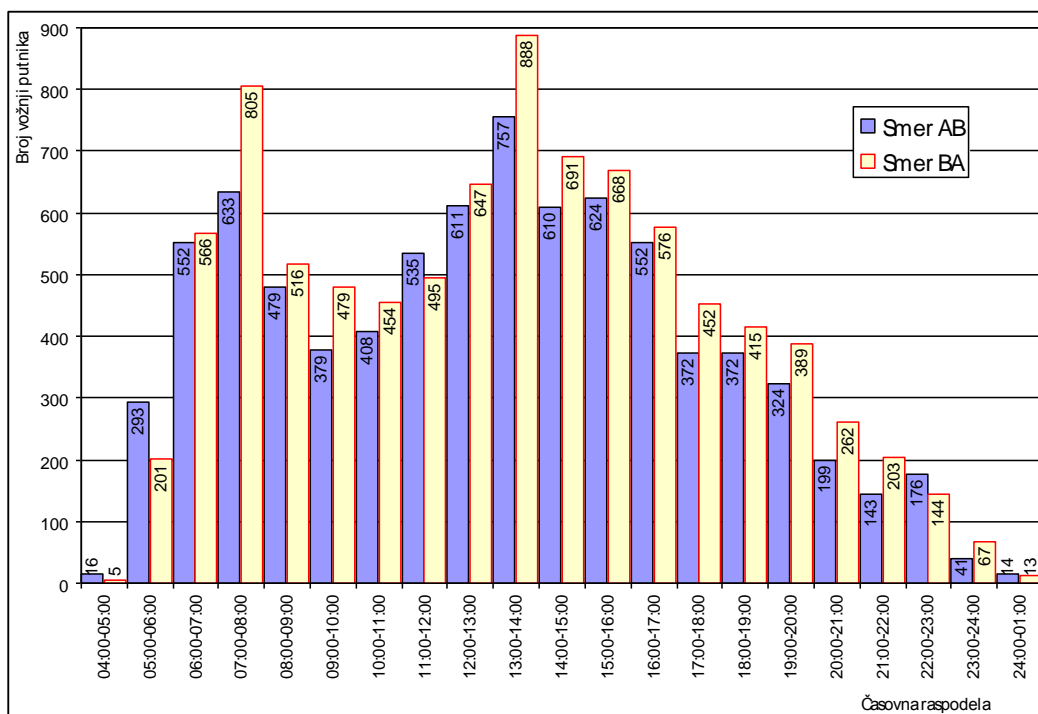
Slika 6.11 Ulasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 3



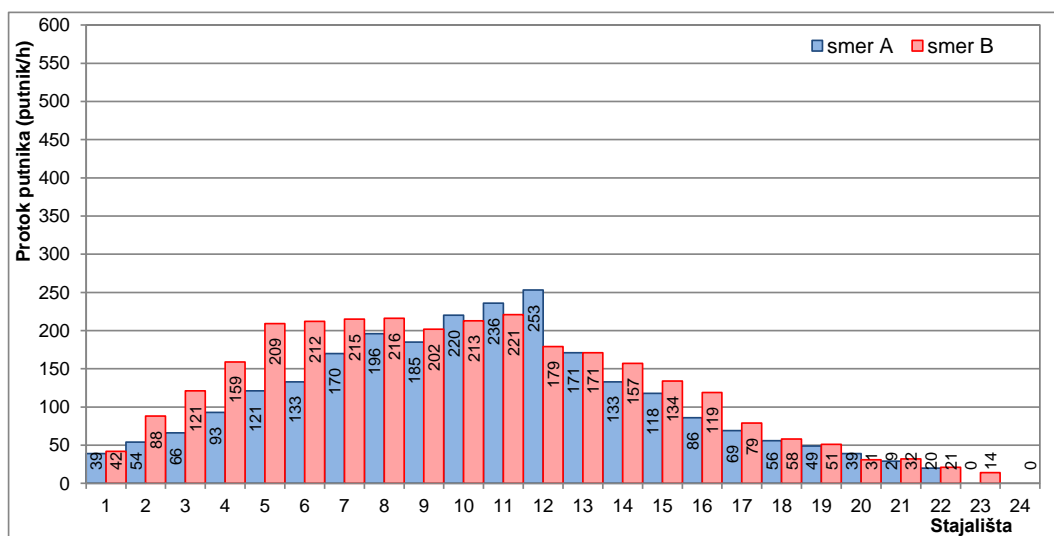
Slika 6.12 Izlasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 3



Slika 6.13 Izlasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 3

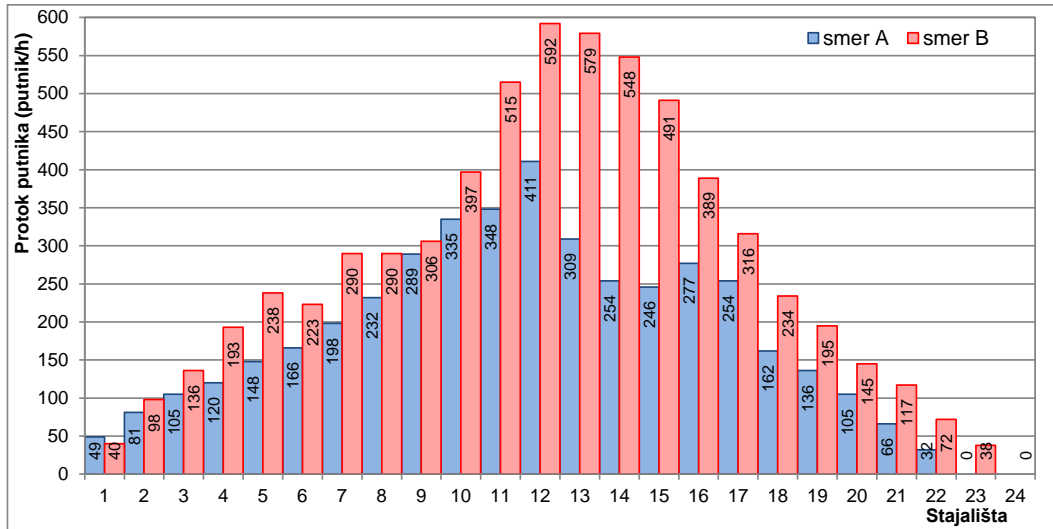


Slika 6.14 Časovna raspodela broja vožnji putnika u toku dana po smerovima na liniji 5

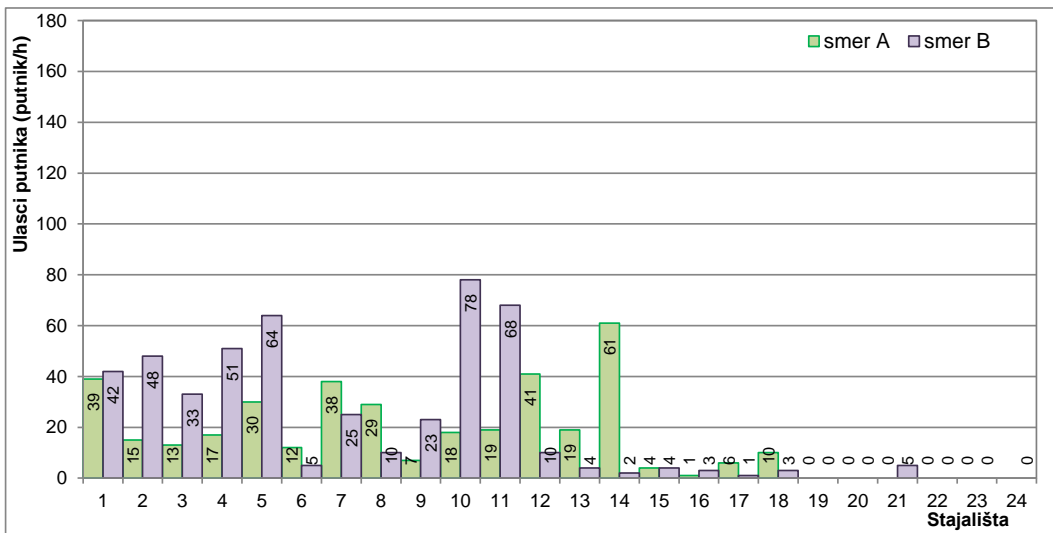


Slika 6.15 Protok putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 5

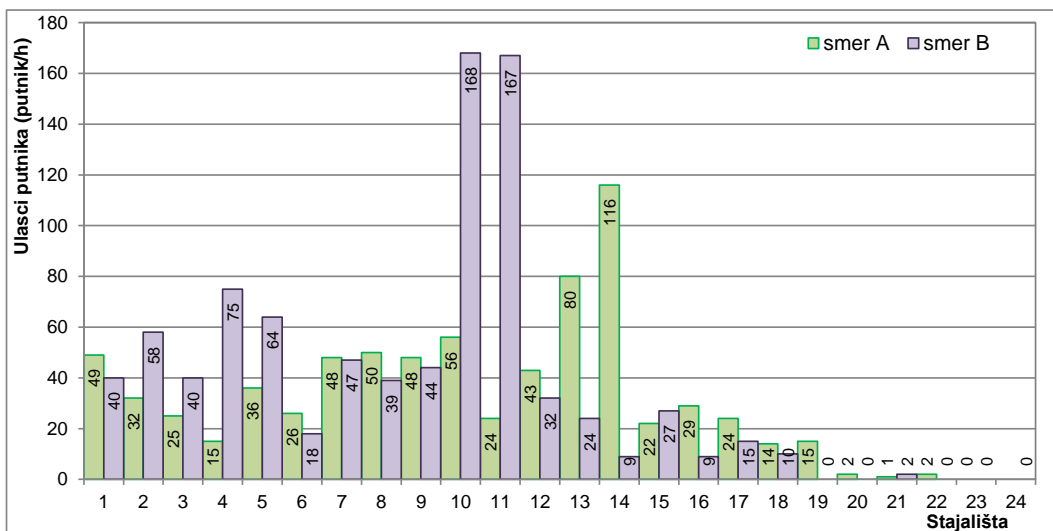




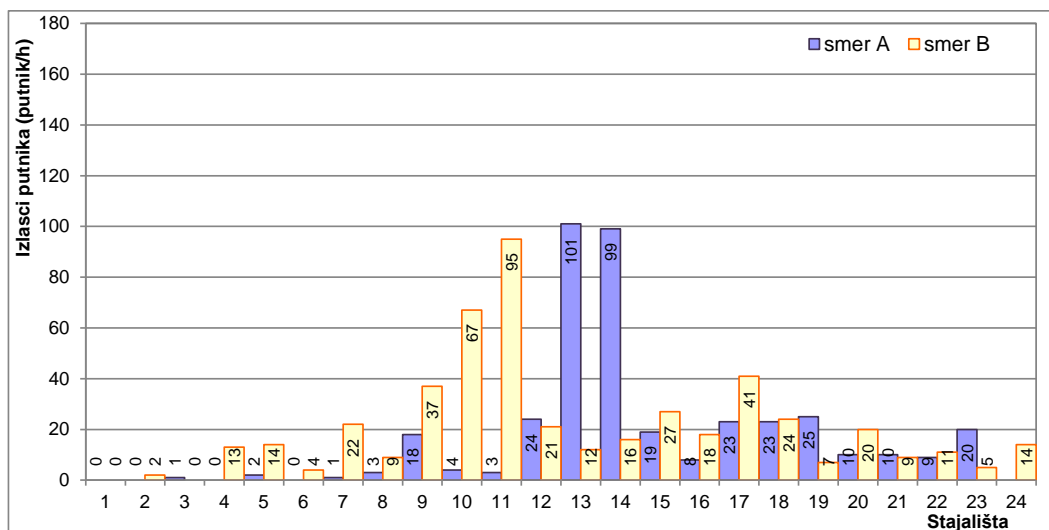
Slika 6.16 Protok putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 5



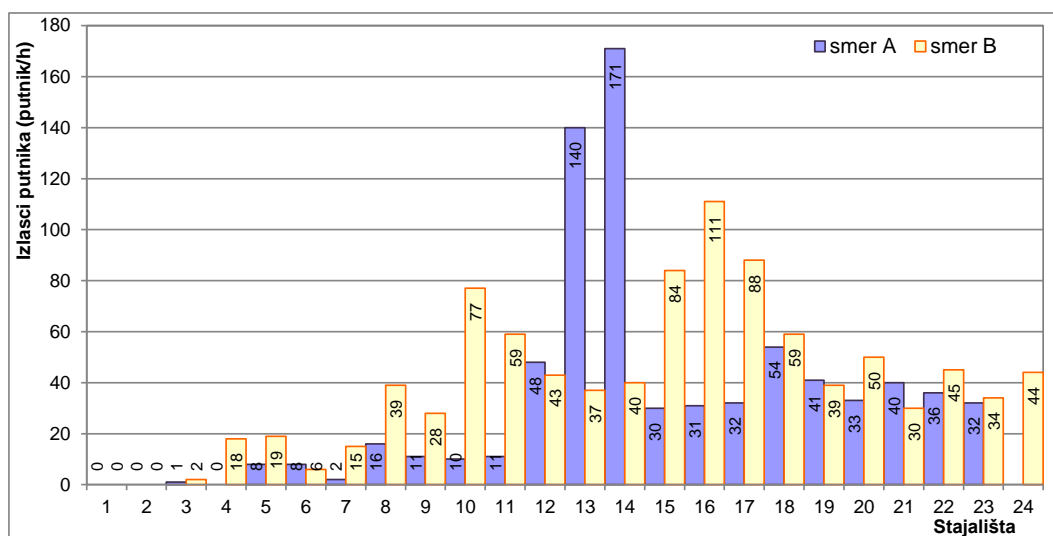
Slika 6.17 Ulasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 5



Slika 6.18 Ulasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 5



Slika 6.19 Izlasci putnika za period 9:00–10:00 časova na liniji broj 5



Slika 6.20 Izlasci putnika za popodnevni vršni sat 13:00–14:00, na liniji broj 5

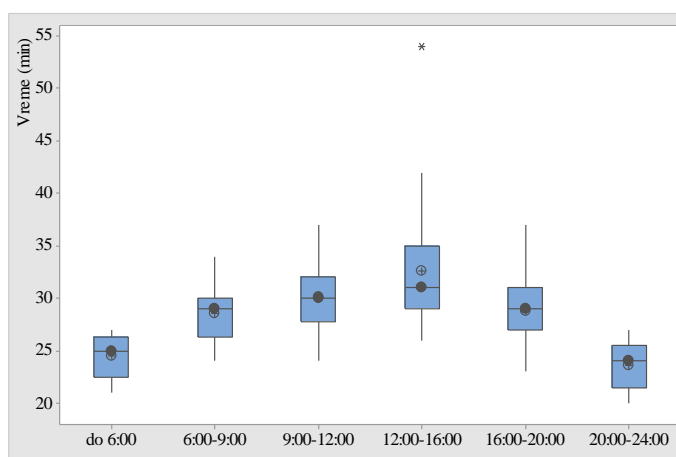
### 6.3.3 Karakteristike realizovanih dinamičkih elemenata

Usled delovanja različitih faktora tokom realizacije reda vožnje dolazi do odstupanja pojedinih dinamičkih elemenata u odnosu na projektovane vrednosti. U okviru ovog podpoglavlja, za linije broj 3 i broj 5, izvršena je analiza odstupanja realizovanih dinamičkih elemenata linija u odnosu na projektovane vrednosti. Za potrebe analize određeni su periodi vremena u toku dana za koje važe približno isti uslovi funkcionisanja sistema (Tabela 6.5). Detaljni rezultati analize su predstavljeni samo za periode u kojima je primenjen postupak optimizacije. Analiza sprovedenog istraživanja pokazala je da u pojedinim periodima dana postoje značajna odstupanja realizovanih vrednosti od projektovanih, i to kod: vremena obrta, intervala sleđenja i frekvencije vozila.

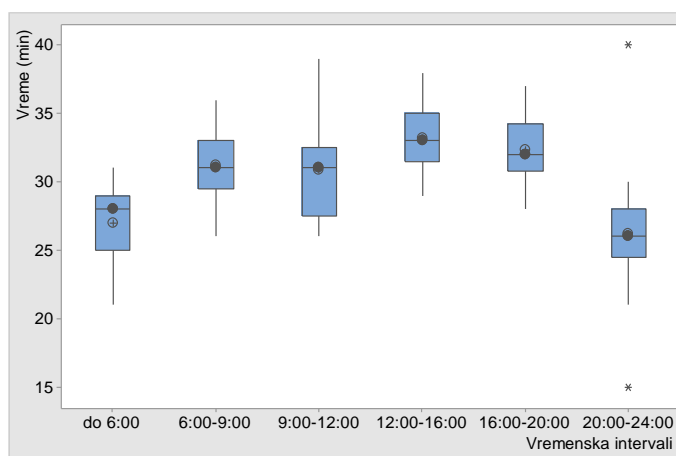
Tabela 6.5 Prosečni projektovani intervali sleđenja po periodima u toku dana

Period dana	do 6:00	6:00-9:00	9:00-12:00	12:00-16:00	16:00-20:00	20:00-24:00
<b>Linija broj 3</b> Projektovan interval (min)	17,5	8,3	10,0	8,3	10,0	17,5
<b>Linija broj 5</b> Projektovan interval (min)	14,6	7,6	10,3	7,6	10,3	14,6

Ravnomeran interval sleđenja uslovljen je jednakim vremenima poluobrtu vozila. Na slikama 6.21 i 6.22 predstavljena je raspodela vremena poluobrtu po definisanim periodima u toku dana.

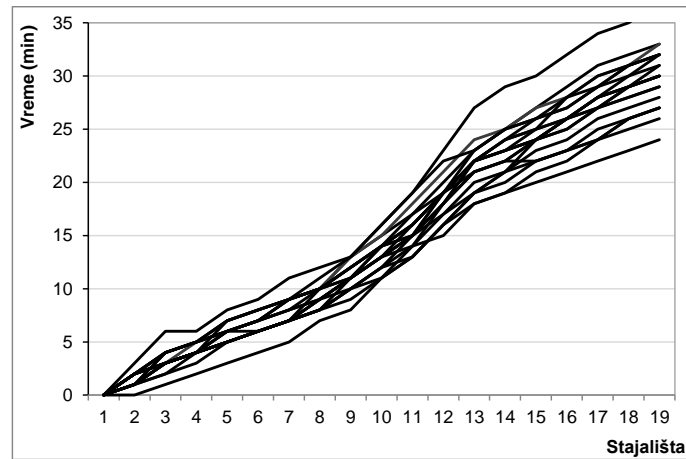


Slika 6.21 Box plot vremena poluobrtu po periodima u toku dana – linija broj 3

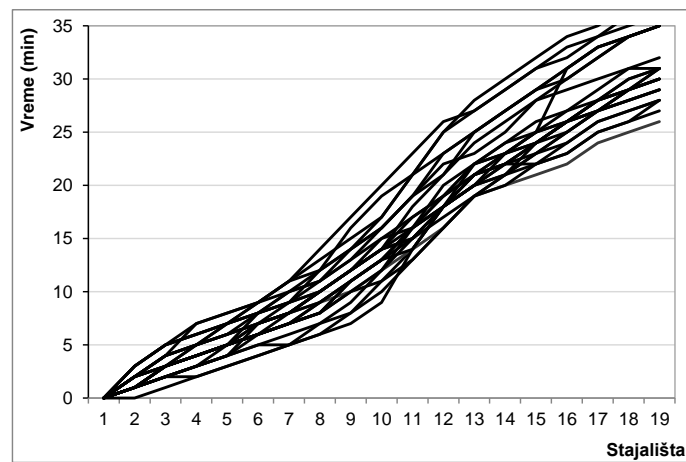


Slika 6.22 Box plot vremena poluobrtu po periodima u toku dana – linija broj 5

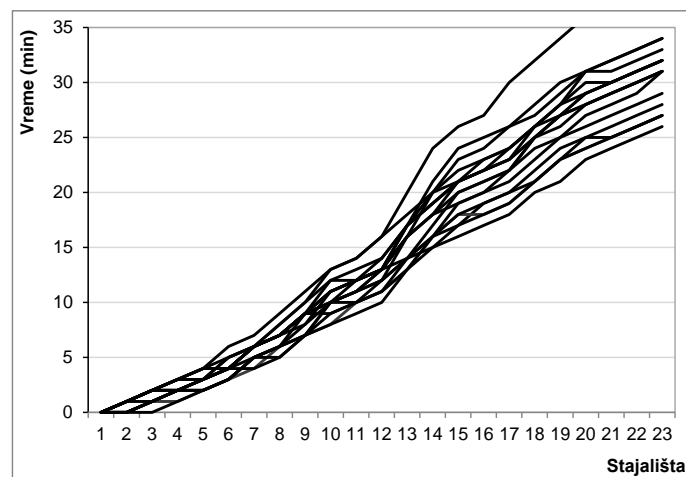
Na predmetnim linijama, u skladu sa metodologijom istraživanja, za kontrolne tačke su usvojena postojeća stajališta duž linije, na kojima su registrovana prolazna vremena vozila tokom poluobrtu. Varijacije prolaznih vremena vozila povećavaju se sa brojem pređenih stajališta duž linije (Slika 6.23, Slika 6.24, Slika 6.25, Slika 6.26).



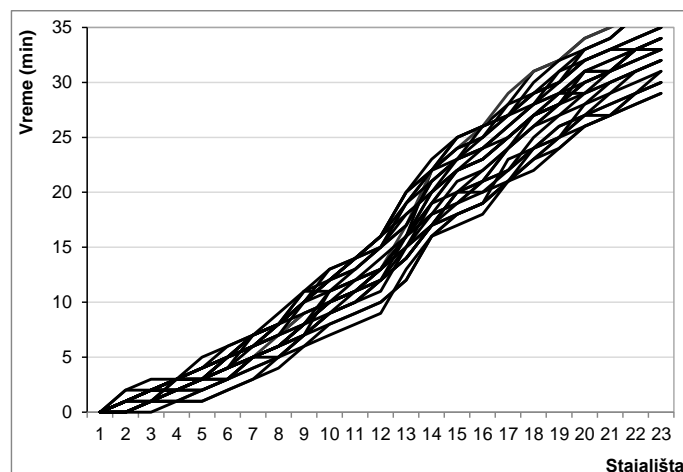
Slika 6.23 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 3, 9:00-12:00



Slika 6.24 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 3, 12:00-16:00

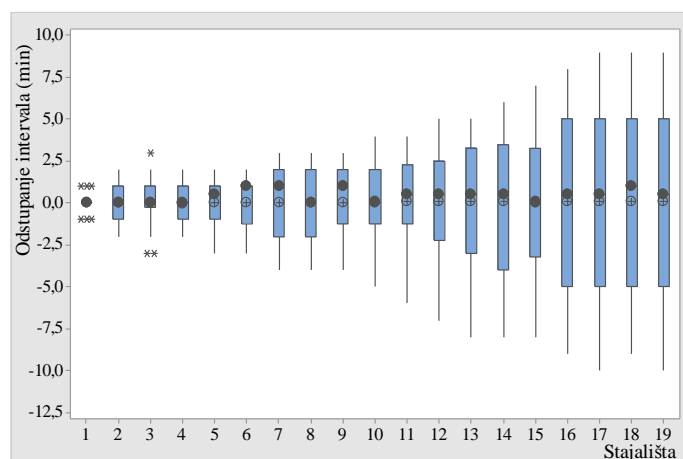


Slika 6.25 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 5, 9:00-12:00

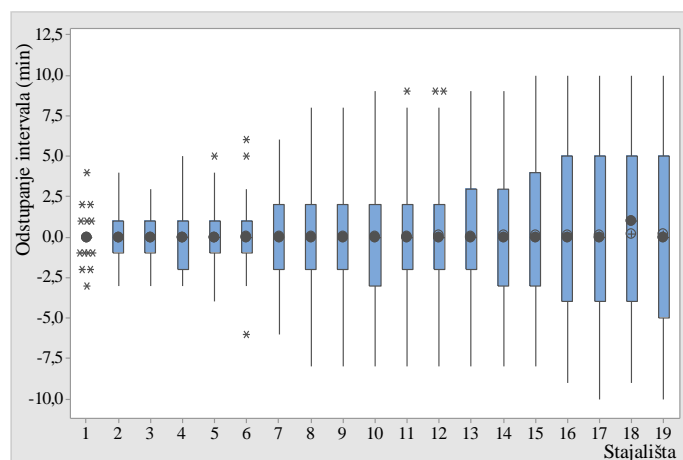


Slika 6.26 Varijacije vremena kretanja vozila po stajalištima duž linije 5,12:00-16:00

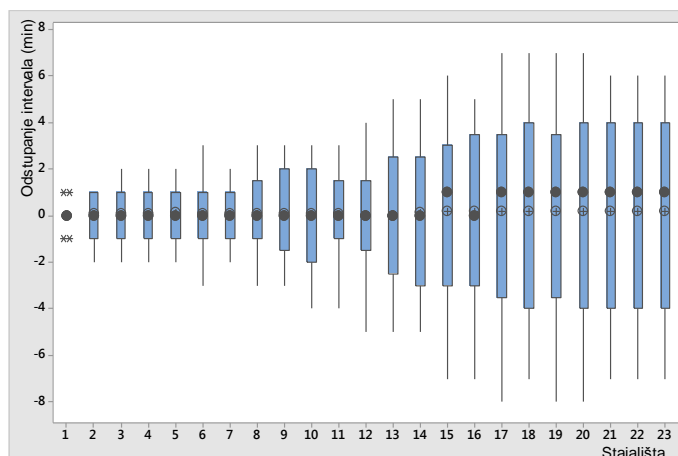
Prikazane varijacije u vremenu kretanja vozila duž linije upućuju na postojanje razlike između stvarnih i projektovanih intervala sleđenja vozila. Odstupanje zabeleženih intervala sleđenja od projektovanih vrednosti na linijama broj 3 i broj 5, raste sa udaljavanjem vozila od terminusa odnosno sa povećanjem broja pređenih stajališta tokom poluoobra (Slika 6.27, Slika 6.28, Slika 6.29, Slika 6.30).



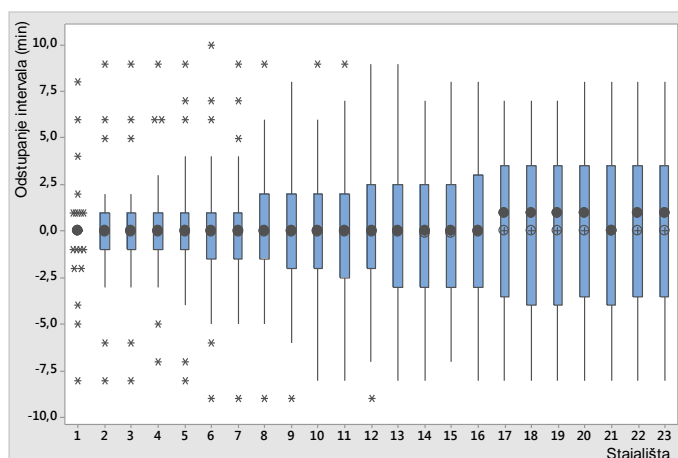
Slika 6.27 Prikaz varijacije intervala po stajalištima duž linije 3, 9:00-12:00



Slika 6.28 Prikaz varijacije intervala sleđenja po stajalištima duž linije 3,12:00-16:00

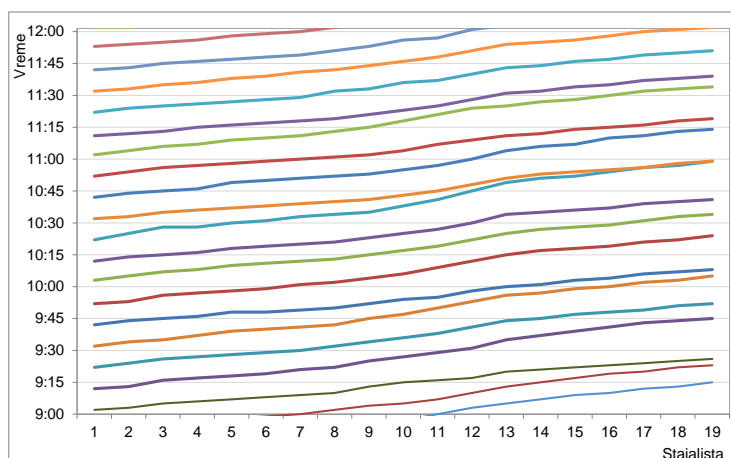


Slika 6.29 Prikaz varijacije intervala po stajalištima duž linije 5, 9:00-12:00

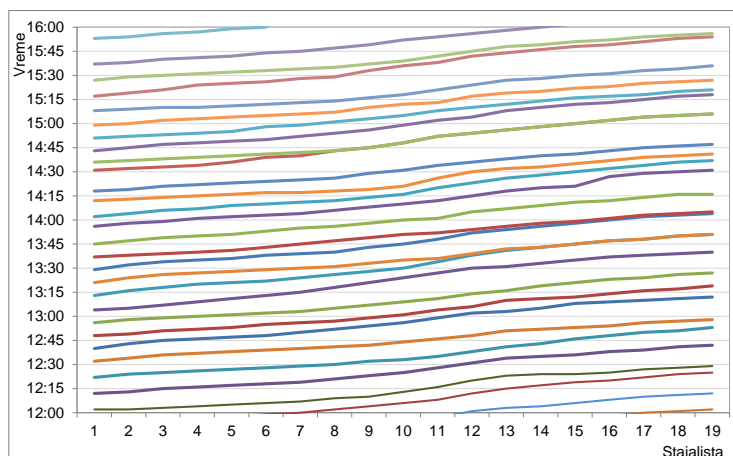


Slika 6.30 Prikaz varijacije intervala sleđenja po stajalištima duž linije 5, 12:00-16:00

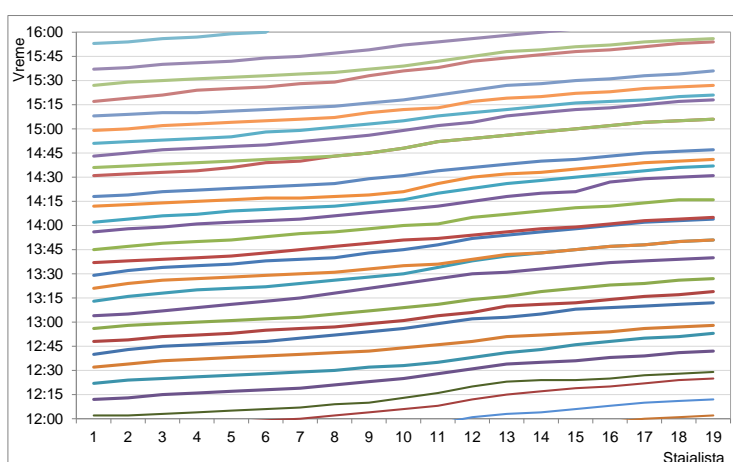
Na osnovu prostor-vreme dijagrama kretanja vozila na predmetnim linijama zaključuje se da nastali poremećaji intervala sleđenja vozila, u prvom delu linije, često kulminiraju uparivanjem dva ili više uzastopnih vozila (npr. polazak 10:22 na liniji broj 3 - Slika 6.31). Lokacija i intenzitet primarnog poremećaja značajno utiču na stepen ravnomernosti intervala sleđenja vozila.



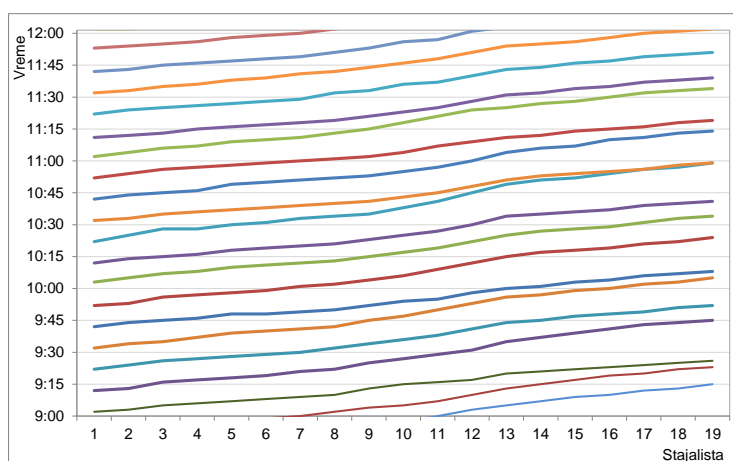
Slika 6.31 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 3, 9:00-12:00



Slika 6.32 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 3, 12:00-16:00



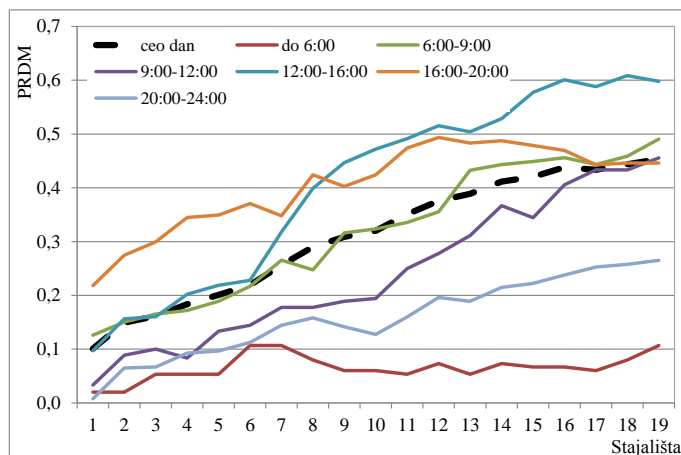
Slika 6.33 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 5, 9:00-12:00



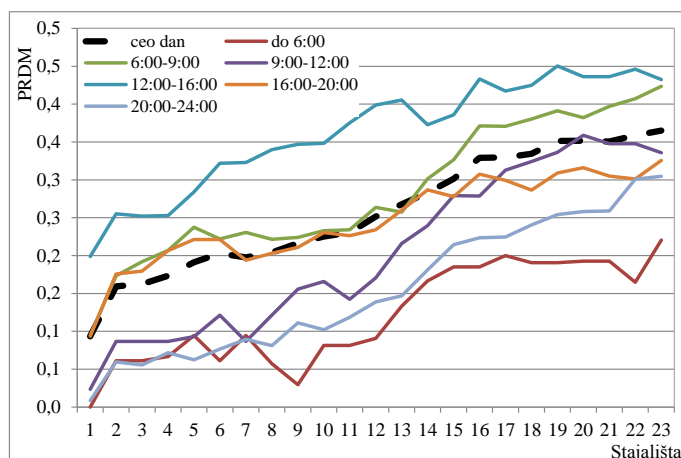
Slika 6.34 Prikaz prostor – vreme dijagrama kretanja vozila duž linije 5, 12:00-16:00

Kvantifikovanje ravnomernosti intervala na linijama broj 3 i broj 5 izvršeno je parametrom PRDM, koji je definisan u poglavlju 3.6.2. Na osnovu vrednosti parametra PRDM (Slika 6.35, Slika 6.36) zaključuje se da se stepen ravnomernosti intervala sleđenja na predmetnim linijama razlikuje po periodima u toku dana i po stajalištima duž linije.

Najbolja ravnomernost intervala sleđenja vozila, odnosno najmanje vrednosti PRDM, dobijene su u periodu do 6:00 časova i u periodu posle 20:00 časova. Najlošija ravnomernost intervala sleđenja vozila ostvaruje se u periodu 12:00-16:00 časova i periodu 16:00-20:00 časova.



Slika 6.35 Prikaz parametra PRDM po stajalištima duž linije 3



Slika 6.36 Prikaz parametra PRDM po stajalištima duž linije – linija broj 5

Udaljavanjem vozila od polaznog terminusa ravnomernost intervala sleđenja vozila značajno opada. Posmatrano za ceo dan, prosečna vrednost PRDM na prvim stajalištima u poluobrtu se kreće u intervalu od 0,1 do 0,2, a na poslednjim stajalištima iste linije vrednost PRDM je i do tri puta veća.

Zbog nepostojanja konkretnih operativnih mera i strategija za upravljanje ravnomernošću intervala sleđenja vozila na analiziranim linijama, nastali poremećaji na jednom polasku se prenose na naredne polaske koji slede po redu vožnje. Poremećaji koji su nastali u prvoj četvrtini linije, a PRDM im je veći od 0,5 su značajno uticali na ravnomernost sleđenja vozila na više od 4 naredna polaska, dok poremećaji koji su nastajali u drugoj polovini linije bez obzira na intenzitet poremećaja nisu značajnije uticali na ravnomernost sleđenja vozila na narednim polascima.



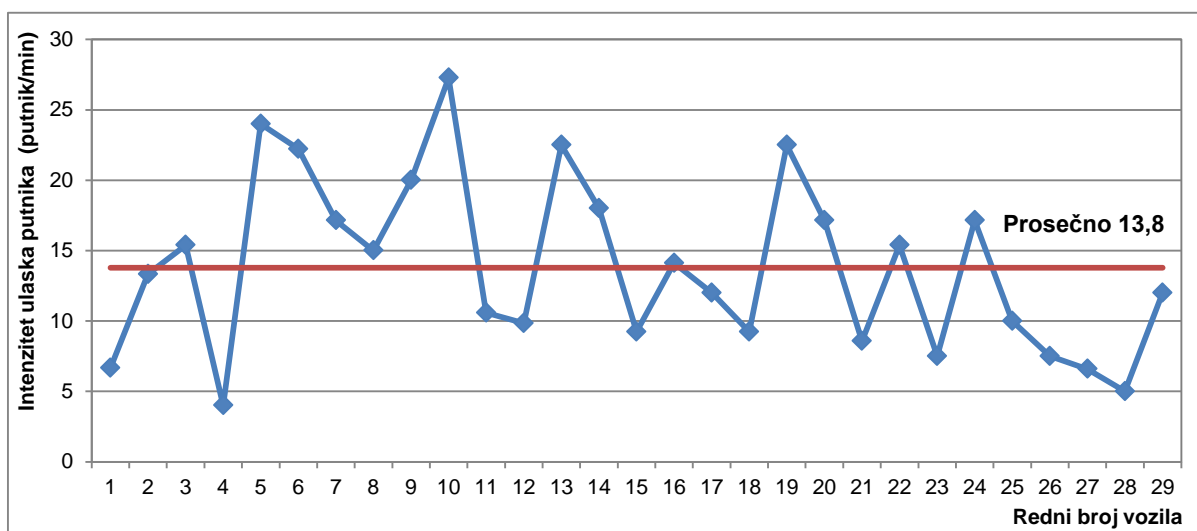
## 6.4 ISTRAŽIVANJE INTENZITETA ULAZAKA PUTNIKA U VOZILO

Za potrebe praktične primene modela sprovedeno je istraživanje u sistemu JGPP-a u Novom Sadu, sa ciljem utvrđivanja intenziteta ulazaka putnika u vozilo. Istraživanje je obuhvatilo merenje vremena zadržavanja vozila na stajalištu, kao i brojanje putnika koji su ušli u vozilo. Istraživanje je vršeno manuelno pomoću istraživača - brojača. Za merenje vremena korišćen je mobilni telefon i android aplikacija [StopWatch&Timer](#), dok je brojanje putnika koji su ušli u vozilo vršeno manuelno. Rezultati istraživanja su upisivani u unapred pripremljene obrasce (Slika 6.4, Slika 6.41). Režim izmene putnika u sistemu JGPP-a, u vreme istraživanja, podrazumevao je ulazak putnika na prednja vrata vozila, dok su ostala vrata namenjena za izlazak putnika iz vozila.

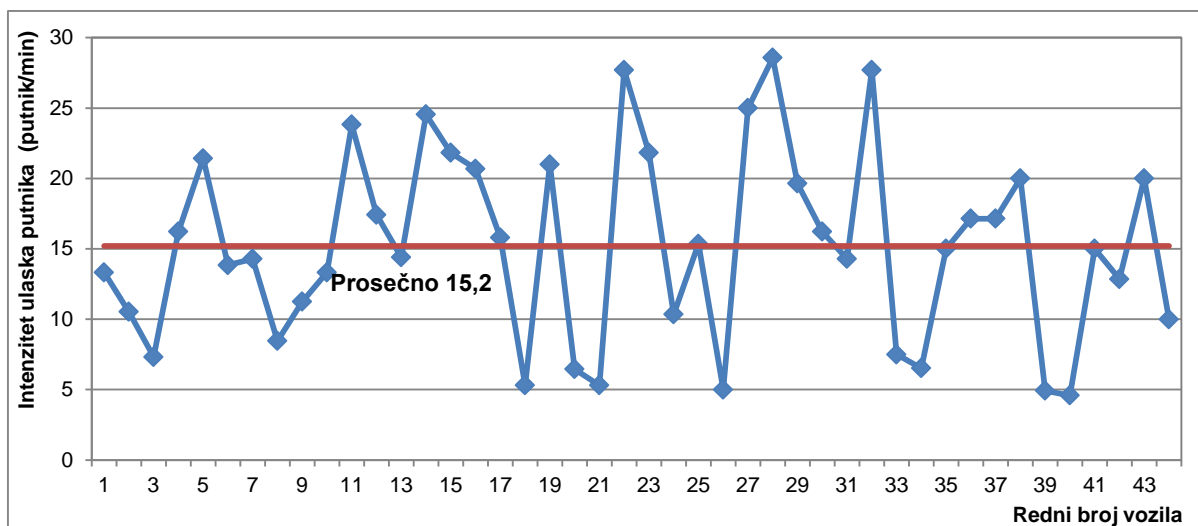
Istraživanje je realizovano u dve faze. U prvoj fazi, istraživanje je obuhvatilo merenje vremena ulazaka putnika na unapred određenim stajalištima i obuhvatilo je sve linije koje koriste navedena stajališta. Utvrđivanje intenziteta ulazaka putnika u drugoj fazi bilo je sastavni deo kontrolnog brojanja na liniji broj 2 (Centar–Novo naselje).

U okviru prve faze istraživanje je realizovano na stajalištu Bulevar Oslobođenja - Lutrija Vojvodine i na stajalištu Bulevar Mihajla Pupina – RK “Bazar”. Merenje je vršeno u sredu 11.03.2015. godine u periodu od 9:00 do 11:00 časova na stajalištu Bul.Oslobođenja-Lutrija Vojvodine i 12:00 do 14:00 časova na stajalištu Bulevar Mihajla Pupina – RK “Bazar”.

Istraživanje je obuhvatilo 73 zaustavljanja vozila na stajalištu, pri čemu je registrovano 958 ulazaka putnika. Na stajalištu Bul. Oslobođenja – Lutrija Vojvodine utvrđen je prosečan intenzitet ulazaka putnika od 13,8 putnika/min, a na stajalištu Bulevar Mihajla Pupina – RK “Bazar” 15,2 putnika/min (Slika 6.37, Slika 6.38).

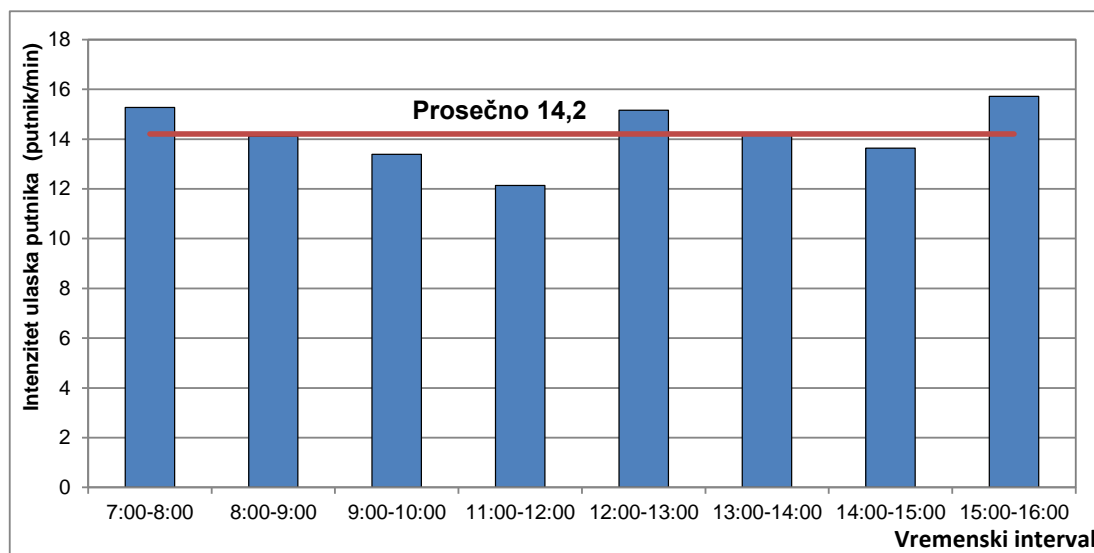


Slika 6.37 Intenzitet ulazaka putnika u vozilo – Bul.Oslobođenja - Lutrija Vojvodine

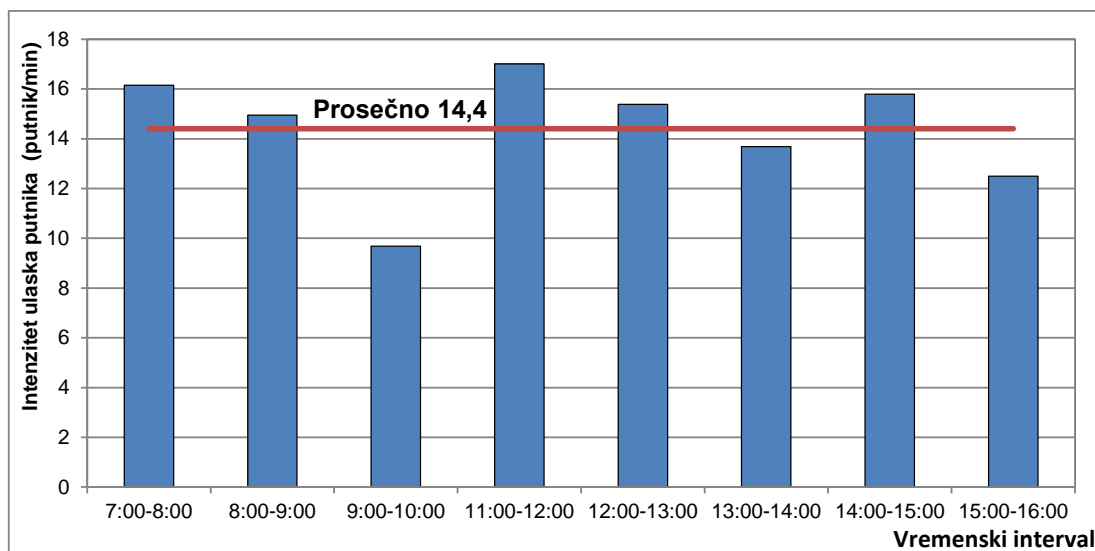


Slika 6.38 Intenzitet ulazaka putnika u vozilo – Bulevar Mihajla Pupina – RK “Bazar“

Istraživanje intenziteta ulazaka putnika u vozilo (druga faza) realizovano je u okviru kontrolnog brojanja putnika na liniji broj 2. Kontrolno brojanje u vozilima JGPP-a je realizovano u sredu 22.04.2015. godine u periodima od 7:00 do 9:00 časova i od 11:00 do 16:00 časova. Brojanje putnika je izvršeno na svim stajalištima duž linije prema metodologiji predstavljenoj u poglavlju 6.3.1. Pored brojanja ulazaka i izlazaka putnika, pomoću android aplikacija [StopWatch&Timer](#) u unapred pripremljenih obrazaca (Slika 6.41) manuelno je mereno zadržavanje vozila na stajalištima duž linije.




Slika 6.39 Srednja vrednost intenziteta ulazaka putnika u vozilo – smer A



Slika 6.40 Srednja vrednost intenziteta ulazaka putnika u vozilo – smer B

U okviru istraživanja intenziteta ulazaka putnika u vozilo, na liniji broj 2 (posmatrano oba smera zajedno), zabeleženo je 942 zaustavljanja vozila na stajalištima, pri čemu je registrovano 5821 ulazaka putnika. Rezultati istraživanja pokazuju da je prosečan intenzitet ulazaka putnika na liniji 2 u smeru A 14,2 putnika/min, a u smeru B 14,4 putnika/min.

Za potrebe praktične primene modela, a u skladu sa rezultatima istraživanja za prosečan intenzitet ulazaka putnika u vozila JGPP-a u Novom Sadu, usvojena je vrednost od 14,3 putnika/minuti.

ГРАД НОВИ САД	БРОЈАЊЕ ПУТНИКА У ЈАВНОМ ПРЕВОЗУ НОВОГ САДА		 ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА, НОВИ САД	
	РЕГИСТАРСКИ БРОЈ:			
	ГАРАЖНИ БРОЈ:			
	ДАТУМ БРОЈАЊА:			
НАЗИВ ЛИНИЈЕ:	Центар – Ново насеље	2		

СМЕР А: ЦЕНТАР – НОВО НАСЕЉЕ			ВРЕМЕ ПОЛАСКА		
Р. Б.	Шифра стajалишта	НАЗИВ СТАЈАЛИШТА	ВРЕМЕ доласка на стajалиште	Отварање врата (min:sek,stot)	Затварање врата (min:sek,stot)
1	0128BT1	УСПЕНСКА - ШАФАРИКОВА		00 : 00,00	___ : ___
2	0301A	ФУТОШКА - БУЛ. ОСЛОБОЂЕЊА		___ : ___	___ : ___
3	0302A	ФУТОШКА - БРАНИСЛАВА НУШИЋА		___ : ___	___ : ___
4	0303A	ФУТОШКА - ЈОДНА БАЊА		___ : ___	___ : ___
5	0304A	ФУТОШКА - БОЛНИЦА		___ : ___	___ : ___
6	0305A	ФУТОШКА - БУЛЕВАР ЕВРОПЕ		___ : ___	___ : ___
7	0307A	ФУТОШКА - ЈУГОЛАТ		___ : ___	___ : ___
8	0307/1A	БУЛ. С. ЈОВАНОВИЋА - ФУТОШКИ ПУТ		___ : ___	___ : ___
9	0307/2A	БУЛ. С. ЈОВАНОВИЋА – Б. БОРОТЕ		___ : ___	___ : ___
10	0321B	БУЛ. Ј. ДУЧИЋА - БУЛ. С. ЈОВАНОВИЋА		___ : ___	___ : ___
11	0322B	БУЛ. Ј. ДУЧИЋА - БРАЋЕ ДРОЊАК		___ : ___	___ : ___

Slika 6.41 Obrazac za merenje vremena zadržavanja vozila na stajalištu

## 7 PRAKTIČNA PRIMENA MODELA

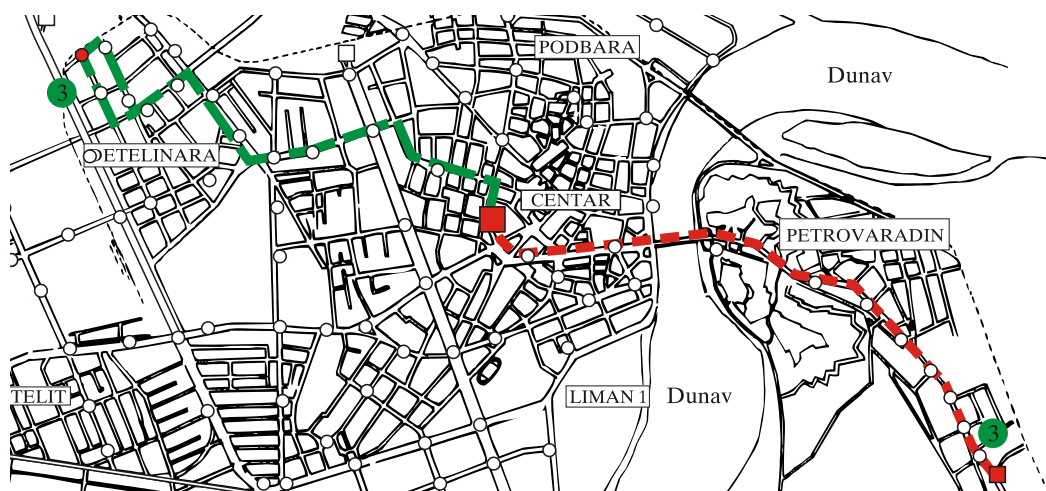
Praktična primena razvijenog postupka optimizacije statičkih elemenata linije u cilju povećanja otpornosti sistema na poremećaj izvršena je na primeru realnih linija javnog gradskog prevoza putnika u Novom Sadu. Postupak optimizacije kombinuje realne elemente linije i karakteristike kretanja putnika na liniji sa modelom širenja poremećaja intervala sleđenja vozila duž linije. U skladu sa područjem primene postupka optimizacije, praktična primena je izvršena na samo jednom delu mreže linija u Novom Sadu, odnosno na dijametralnim linijama broj 3 i broj 5. Budući da je model širenja poremećaja ograničen na intervale manje od 15 minuta praktična primena je izvršena za dva karakteristična perioda. Prvi period predstavlja režim rada linije u maksimalnom opterećenju, pri čemu su korišćeni podaci za vršni sat, 13:00-14:00 časova. Drugi period predstavlja režim rada linije sa najmanjim opterećenjem uz poštovanje ograničenja modela, za ovaj period je izabran vanvršni sat 9:00-10:00 časova. U ovom poglavlju je ispitana praktična primena i upotrebljivost razvijenog modela i postupka optimizacije.

### 7.1 PODELA DIJAMETRALNE LINIJE (1 faza)

Na osnovu statičkih elemenata linije broj 3 opisanih u poglavlju 6.2.1, a prema definisanoj proceduri u prvoj fazi postupka optimizacije (poglavlje 5.3.1), za tačku podele dijametralne linije određeno je stajalište Uspenska – Šafarikova (Šifra: 0102AT1 / 0127BT1). Navedeno stajalište se nalazi u užem gradskom jezgru i izvedeno je kao terminus. Podelom dijametralne linije u definisanoj tački formiraju se dve radialne linije sa zajedničkim terminusom

(Slika 7.1):

- Linija Petrovaradin – Centar,
- Linija Centar – Detelinara.



Slika 7.1 Prikaz trasa novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 3

Novoformirana linija Petrovaradin – Centar prema načinu pružanja trase svrstava se u radijalne linije i povezuje naselje Petrovaradin ca centrom grada. Projektovana dužina linije u smeru A iznosi dužine 5,0 km, a u smeru B iznosi 4,9 km. U oba smera linija ima po 11 stajališta (Tabela 7.1).

Novoformirana linija Centar – Detelinara prema načinu pružanja trase svrstava se u radijalne linije i povezuje naselje Detelinara ca centrom grada. Projektovana dužina linije u smeru A iznosi dužine 4,05 km, a u smeru B iznosi 3,8 km. U smeru A linija ima 9 stajališta, a u smeru B 10 stajališta (Tabela 7.1).

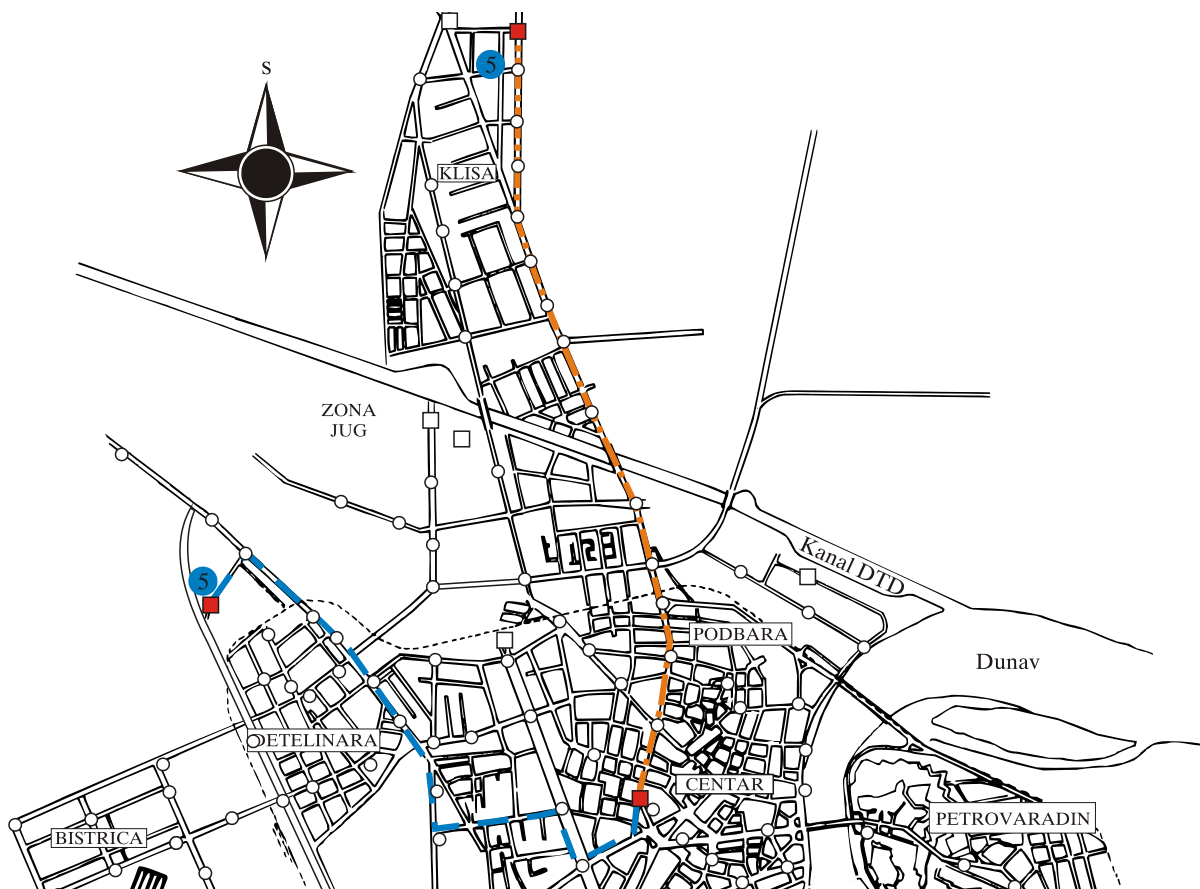
Tabela 7.1 Statički elementi novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 3

Petrovaradin – Centar					Centar – Detelinara				
r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase	r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase
<b>Smer A</b>					<b>Smer A</b>				
1	0610OK	Petrovaradin – Okretnica	0	0	1	0226BKT	Janka Čmelička I	0	0
2	0611B	Petrovaradin – Žel. stanica	500	500	2	0227B	Janka Čmelička II – Škola	300	300
3	0612B	Preradovićeve – Božidar Adžije	600	1100	3	0228B	Kornelija Stankovića III – Pilot	300	600
4	0613B	Preradovićeve – M. Oreškovića	350	1450	4	0217B	Rumenačka – Kor. Stankovića	500	1100
5	0615B	Preradovićeve – Benzin. pumpa	450	1900	5	0218B	Rumenačka – ABC Samoposluga	500	1600
6	0616B	Preradovićeve – Šenoina	300	2200	6	0219B	Kralja Petra I – Sajam	300	1900
7	0617B	Preradovićeve – Lovčki dom	400	2600	7	0220B	Kralja Petra I – Mašinska škola	300	2200
8	0618B	Beogradska – Vladimira Nazora	600	3200	8	0221B	Kralja Petra I – Bul. Oslobođenja	400	2600
9	0619B	Bul. Mih. Pupina – Dunavski park	800	4000	9	0222B	Vojvode Bojović – Socijalno	500	3100
10	0620B	Bul. Mihajla Pupina – rk"bazar"	700	4700	10	0127BT1	Uspenska – Šafarikova	700	3800
11	0102AT1	Uspenska – SNP	300	5000	<b>Smer B</b>				
<b>Smer B</b>					1	0102AT1	Uspenska – SNP	0	0
2	0601A	Bul. Mihajla Pupina – Pothodnik	300	300	2	0201A	Vojvode Bojović – Socialno	700	700
3	0602A	Bul. Mihajla Pupina – Radnički dom	700	1000	3	0202A	Kralja Petra I – Tunel jeftinoće	650	1350
4	0603A	Beogradska – Vladimira Nazora	700	1700	4	0203A	Kralja Petra I – Groblje	400	1750
5	0604A	Preradovićeve – Lovčki dom	600	2300	5	0204A	Rumenačka – Apoteka	500	2250
6	0605A	Preradovićeve – Osnovna škola	400	2700	6	0205A	Rumenačka – Bul. Jaše Tomića	400	2650
7	0606A	Preradovićeve – Reljkovićeve	500	3200	7	0223A	K. Stankovića I – Čika Stevina	300	2950
8	0607A	Preradovićeve – Marina Držića	500	3700	8	0225A	Milenka Grčića – rk"detelinara"	600	3550
9	0608A	Preradovićeve – Franje Malina	500	4200	9	0226BKT	Janka Čmelička I	500	4050
10	0609A	Petrovaradin – Železnička stanica	300	4500					
11	0610OK	Petrovaradin – Okretnica	400	4900					

Na osnovu statičkih elemenata linije broj 5 opisanih u poglavlju 6.2.1, a prema definisanoj proceduri u prvoj fazi postupka optimizacije (poglavlje 5.3.1), za tačku podele dijametralne linije određeno je stajalište Uspenska – Šafarikova (Šifra: 0102AT1 / 0127BT1). Navedeno stajalište se nalazi u užem gradsko jezgru i izvedeno je kao terminus. Podelom dijametralne linije u definisanoj tački formiraju se dve radijalne linije sa zajedničkim terminusom

(Slika 7.2):

- Linija Temerinski put – Centar,
- Linija Centar – Avijatičarsko naselje.



Slika 7.2 Prikaz trasa novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 5

Novoformirana linija Temerinski put – Centar prema načinu pružanja trase svrstava se u radijalne linije i povezuje naselje Klisa sa centrom grada. Projektovana dužina linije u smeru A iznosi dužine 5,4 km, a u smeru B iznosi 5,5 km. U smeru A linija ima 13 stajališta, a u smeru B 14 stajališta (Tabela 7.2).

Novoformirana linija Centar – Avijatičarsko naselje prema načinu pružanja trase svrstava se u radijalne linije i povezuje Avijatičarsko naselje sa centrom grada. Projektovana dužina linije u smeru A iznosi dužine 4,6 km, a u smeru B iznosi 4,55 km. U oba smera linija ima po 11 stajališta (Tabela 7.2).

Tabela 7.2 Statički elementi novoformiranih linija nastalih podelom linije broj 5

Temerinski put – Centar					Centar – Avijatičarsko naselje				
r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase	r.b	Šifra stajališta	Naziv stajališta	Međ. rast.	Dužina trase
<b>Smer A</b>					<b>Smer A</b>				
1	0143OK	Temerinski put – OK "Rodić"	0	0	1	0209OK	Avijatičarska – Kasarna	0	0
2	0144B	Temerinski put – Savska	400	400	2	0215B	Rumenački put – Jastreb	600	600
3	0145B	Temerinski put – Velebitska	300	700	3	0216B	Rumenačka – Benzinska pumpa	450	1050
4	0146B	Temerinski put – A.Varađanina	300	1000	4	0217B	Rumenačka – K.Stankovića	500	1550
5	0147B	Temerinski put – Stovarište bor	300	1300	5	0218B	Rumenačka - ABC samoposluga	400	1950
6	0148B	Temerinski put – O.Keršovanija	300	1600	6	0707A	Hajduk Veljkova - Sajam	500	2450
7	0149B	Temerinska – Najlon pijaca	700	2300	7	0707A/1	Novosadskog sajma - Bazeni	400	2850
8	0150B	Temerinska – Vidovdansko n.	300	2600	8	0707A/2	Novosadskog sajma - Osnovna šk.	400	3250
9	0151B	Temerinska – Šajkaška	850	3450	9	0510A	Bul.Oslobođenja Novosadskog s.	400	3650
10	0152B	Temerinska – Partizanska	400	3850	10	0337B	Jevrejska – Futoška pijaca	400	4050
11	0153B	Temerinska – Koste Šokice	250	4100	11	0103AT1	Uspenska – SNP	550	4600
12	0154B	Temerinska – Pijaca	550	4650	<b>Smer B</b>				
13	0126BT1	Uspenska – Šafarikova	750	5400	1	0126BT1	Uspenska – Šafarikova	0	0
<b>Smer B</b>					2	0536B	Bul.Oslobođenja – Futoška pijaca	650	650
1	0103AT1	Uspenska – SNP	0	0	3	0707B/2	Novosadskog s. – Bul.Oslobođenja	400	1050
2	0131A	Temerinska – Trg Marije Trandafil	600	600	4	0707B/1	Novosadskog s. – Osnovna škola	300	1350
3	0132A	Temerinska – Gunduličeva	350	950	5	0722B	Hajduk Veljkova – Novosadskog s.	500	1850
4	0133A	Temerinska – Patr. Čarnojević	300	1250	6	0204A	Rumenačka – Apoteka	700	2550
5	0134A	Temerinska – Autovojvodina	450	1700	7	0205A	Rumenačka – Bul.Jaše Tomića	400	2950
6	0135A	Temerinska – Šajkaška	200	1900	8	0206A	Rumenačka – Radničko igralište	400	3350
7	0136A	Temerinska – Vidovdansko naselje	900	2800	9	0207A	Rumenački put – Benzinska p.	300	3650
8	0137A	Temerinska – Najlon pijaca	400	3200	10	0208A	Avijatičarska – Jastreb	450	4100
9	0138A	Temerinski put – O. Keršovanija	600	3800	11	0209OK	Avijatičarska – Kasarna	450	4550
10	0139A	Temerinski put – Stovarište Bor	250	4050					
11	0140A	Temerinski put – A. Varađanina	300	4350					
12	0141A	Temerinski put – Velebitska	350	4700					
13	0142A	Temerinski put – Savska	400	5100					
14	0143OK	Temerinski put – OK "Rodić "	400	5500					

Prema definisanoj proceduri novoformirane linije zadržavaju postojeće dinamičke elemente: interval sleđenja, frekvenciju, brzinu obrta, kapacitet linije. Ostali dinamički elementi su određeni u skladu sa statičkim elementima novoformiranih linija.

## 7.2 SIMULACIJA ŠIRENJA POREMEĆAJA INTERVALA SLEĐENJA ( II faza)

U skladu sa definisanim modelom širenja poremećaja intervala sleđenja vozila duž linije u postupku optimizacije izvršena je simulacija širenja poremećaja za obe varijante organizacije prevoza putnika. Simulacija je vršena na osnovu realnih vrednosti prikupljenih podataka (Tabela 7.3, Tabela 7.4, Tabela 7.5) i za različite veličine primarnog poremećaja intervala sleđenja. Kao što je definisano postupkom optimizacije, prvu varijantu predstavlja postojeći način organizacije prevoza (dijametralna linija), a drugu varijantu predstavlja optimizovani način organizacije prevoza (dve radialne linije).

Tabela 7.3 Ulazni podaci za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja

	Linija broj 3		Linija broj 5	
	9:00-10:00	13:00-14:00	9:00-10:00	13:00-14:00
Vremenski period	9:00-10:00	13:00-14:00	9:00-10:00	13:00-14:00
Projektovani interval sleđenja (min)	10	8,3	10,3	7,6
Prosečan intenzitet ulazaka putnika (put/min)	14,3			
Primarni poremećaj intervala sleđenja (min)	0 - 4			

Tabela 7.4 Ulazni podaci za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja - linija 3

Smer A					Smer B				
R.br. Stajališta	9:00-10:00		13:00-14:00		R.br. Stajališta	9:00-10:00		13:00-14:00	
	Ulasci putnika	Izlasci putnika	Ulasci putnika	Izlasci putnika		Ulasci putnika	Izlasci putnika	Ulasci putnika	Izlasci putnika
1	43	0	70	0	1	72	0	81	0
2	59	1	123	2	2	23	0	73	1
3	19	1	36	5	3	36	1	74	15
4	16	2	18	3	4	49	15	71	23
5	26	6	20	12	5	25	18	49	39
6	25	7	38	70	6	27	9	17	15
7	8	0	22	5	7	21	20	25	11
8	35	5	39	7	8	53	41	63	59
9	29	37	81	44	9	42	41	39	34
10	47	74	132	99	10	35	66	66	105
11	45	43	70	84	11	34	71	87	134
12	33	72	58	60	12	19	47	57	61
13	36	73	69	92	13	4	21	7	24
14	11	18	14	58	14	11	22	4	33
15	12	31	35	61	15	4	15	50	49
16	3	26	15	79	16	14	15	14	38
17	2	18	2	49	17	1	18	9	32
18	4	27	1	79	18	3	14	2	55
19	0	29	0	47	19	0	31	2	36
					20	0	18	0	27

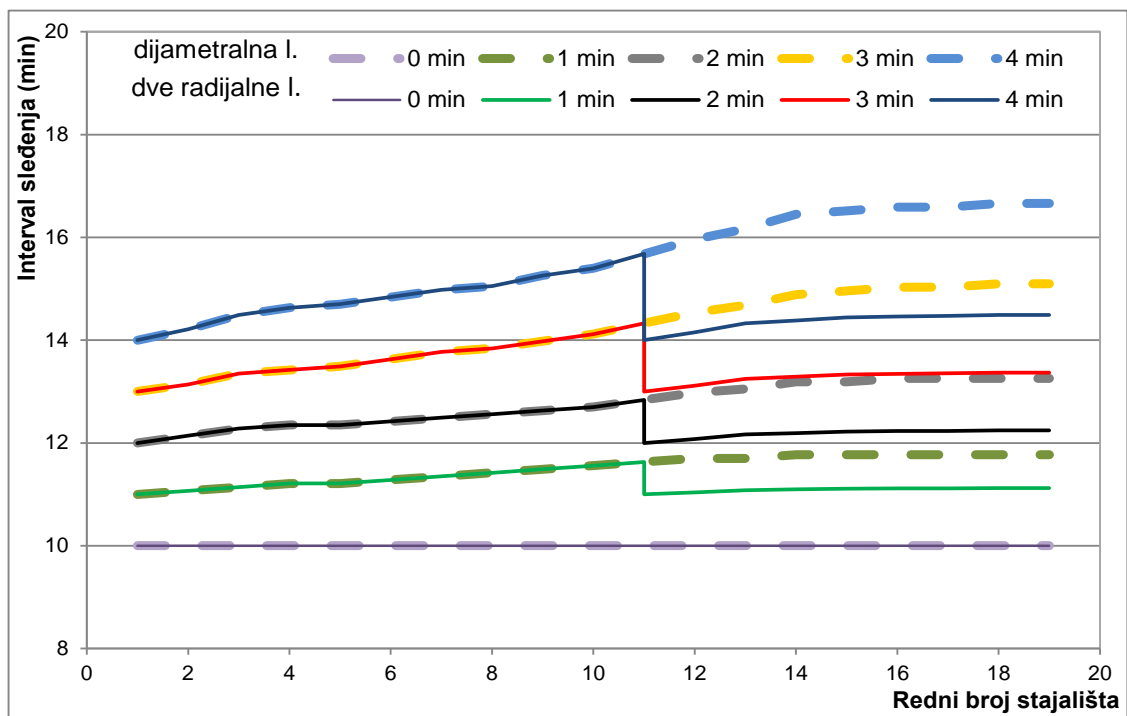
Tabela 7.5 Ulazni podaci za simulaciju širenja poremećaja intervala sleđenja - linija 5

Smer A					Smer B				
R.br. Stajališta	9:00-10:00		13:00-14:00		R.br. Stajališta	9:00-10:00		13:00-14:00	
	Ulasci putnika	Izlasci putnika	Ulasci putnika	Izlasci putnika		Ulasci putnika	Izlasci putnika	Ulasci putnika	Izlasci putnika
1	39	0	49	0	1	42	0	40	0
2	15	0	32	0	2	48	2	58	0
3	13	1	25	1	3	33	0	40	2
4	17	0	15	0	4	51	13	75	18
5	30	2	36	8	5	64	14	64	19
6	12	0	26	8	6	5	4	18	6
7	38	1	48	2	7	25	22	47	15
8	29	3	50	16	8	10	9	39	39
9	7	18	48	11	9	23	37	44	28
10	18	4	56	10	10	78	67	168	77
11	19	3	24	11	11	68	95	167	59
12	41	24	43	48	12	10	21	32	43
13	19	101	80	140	13	4	12	24	37
14	61	99	116	171	14	2	16	9	40
15	4	19	22	30	15	4	27	27	84
16	1	8	29	31	16	3	18	9	111
17	6	23	24	32	17	1	41	15	88
18	10	23	14	54	18	3	24	10	59
19	0	25	15	41	19	0	7	0	39
20	0	10	2	33	20	0	20	0	50
21	0	10	1	40	21	5	9	2	30
22	0	9	2	36	22	0	11	0	45
23	0	20	0	32	23	0	5	0	34
					24	0	14	0	44

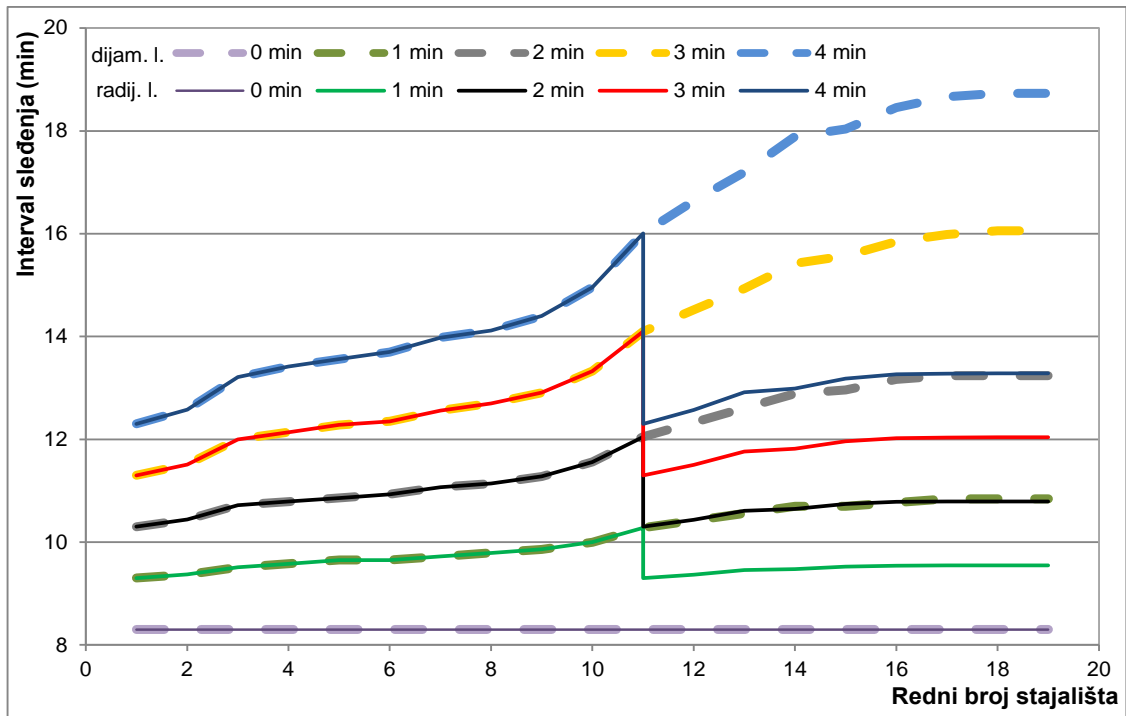


Za obe varijante organizacije prevoza u postupku simulacije korišćene su iste vrednosti primarnog poremećaja intervala sleđenja. Vrednosti poremećaja su varirane u rasponu od 0 do 4 minuta. Isti primarni poremećaj intervala sleđenja je korišćen za dijametralnu liniju i za prvu radijalnu liniju. Na drugoj radijalnoj liniji primarni poremećaj je variran u definisanom rasponu.

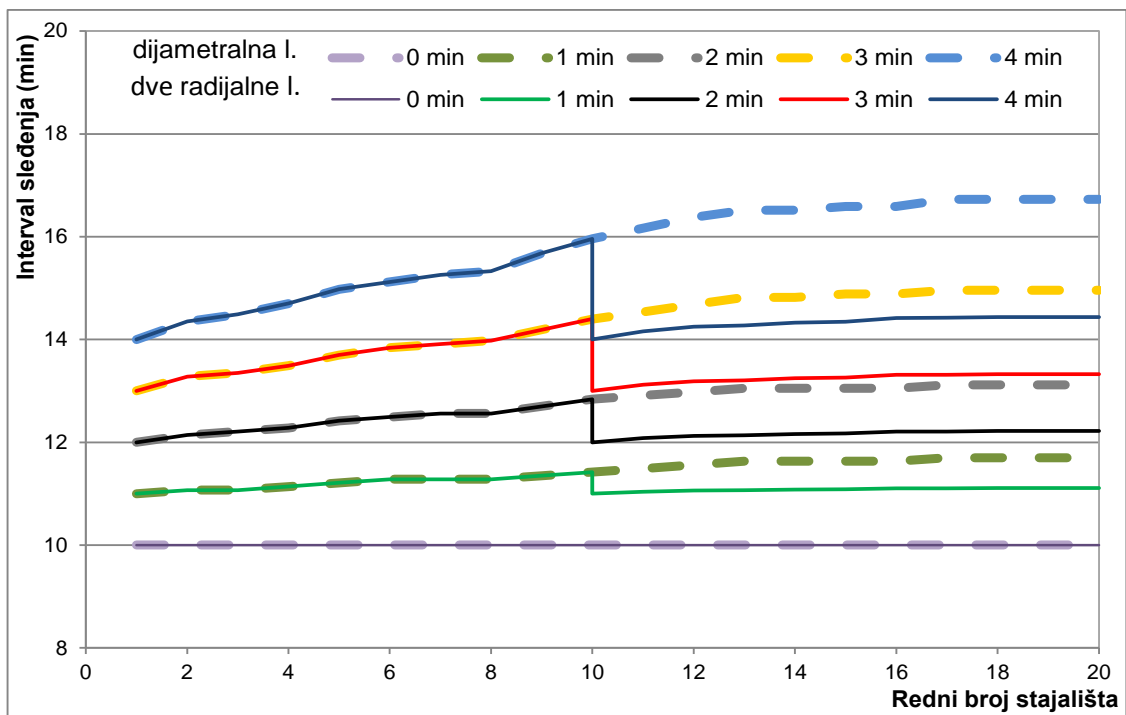
Kod optimizovane varijante u tački podele se prekida proces kumuliranja poremećaja intervala sleđenja vozila, tako da nakon tačke podele kumuliranje poremećaja počinje od idealnog stanja ravnomernosti. Rezultati simulacije intervala sleđenja za različite vrednosti primarnog poremećaja su dati na narednim graficima.



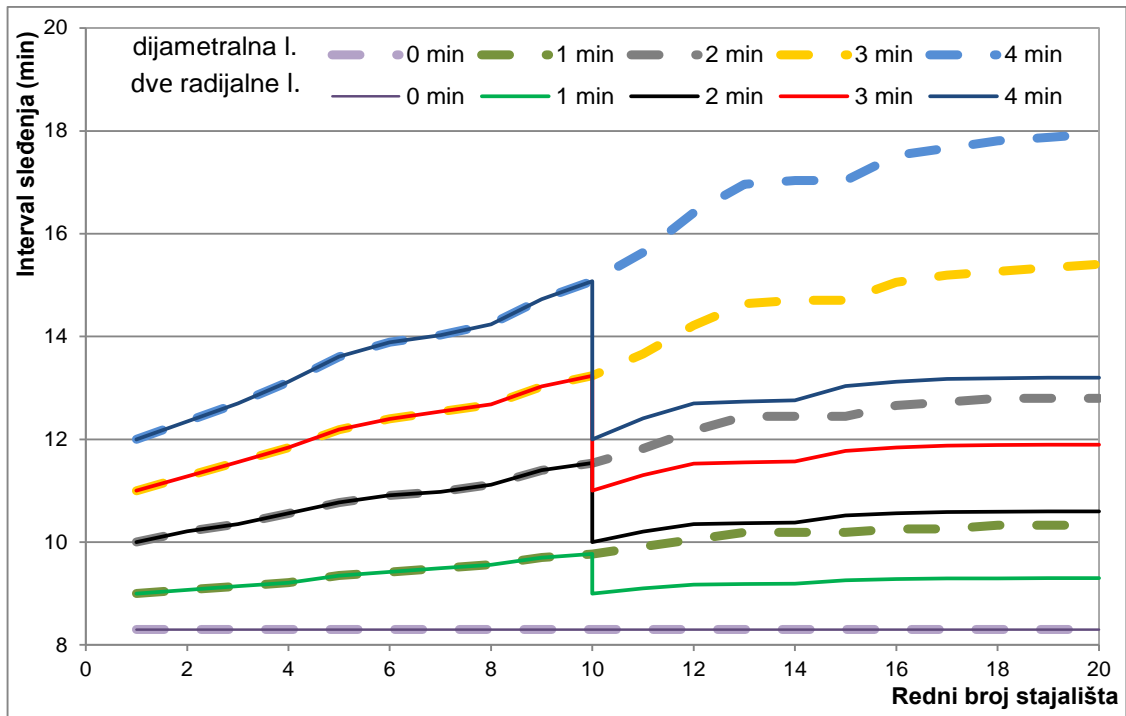
Slika 7.3 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smeru A, period 9:00–10:00



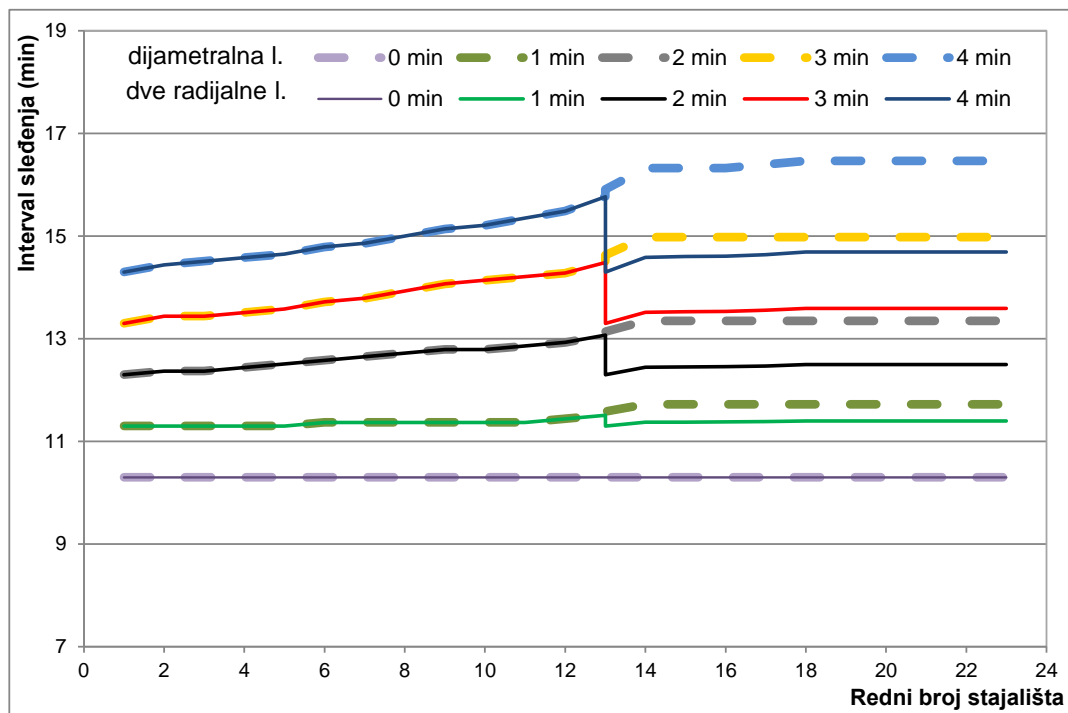
Slika 7.4 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smeru A, period 13:00–14:00



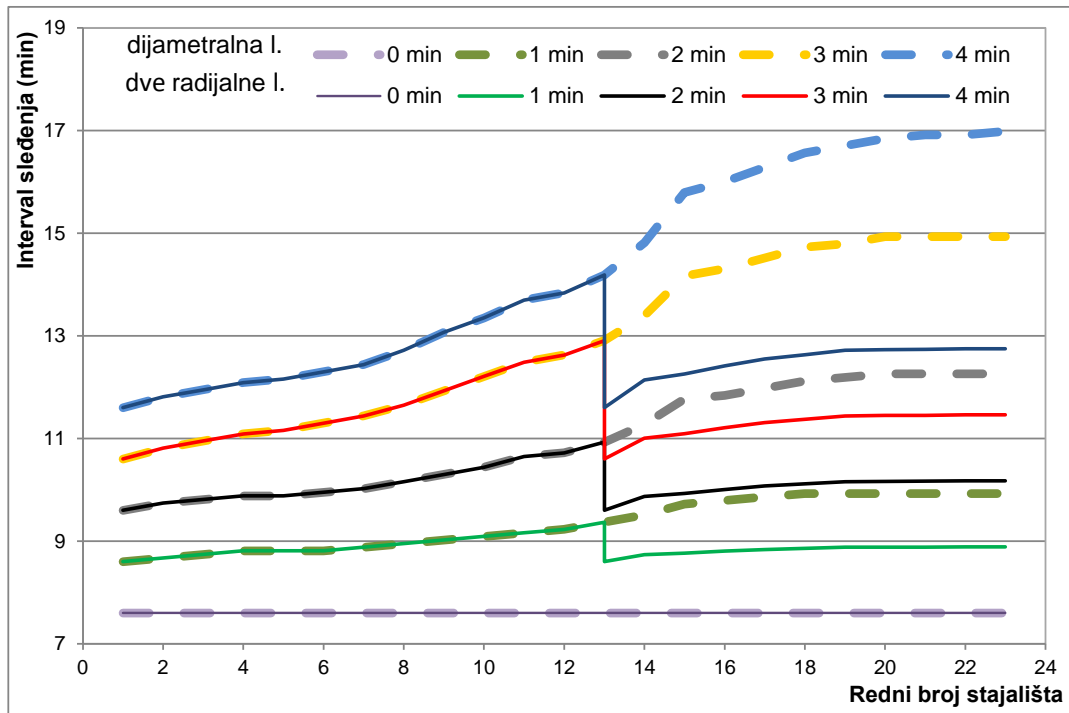
Slika 7.5 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smeru B, period 9:00–10:00



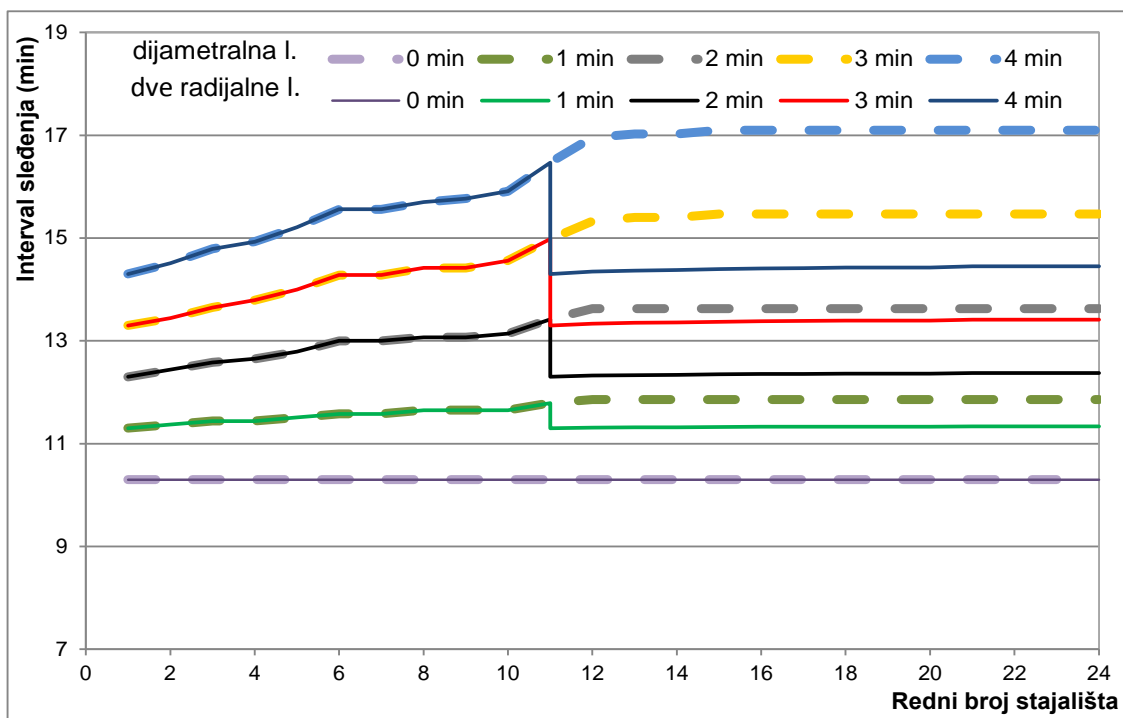
Slika 7.6 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 3, smeru B, period 13:00–14:00



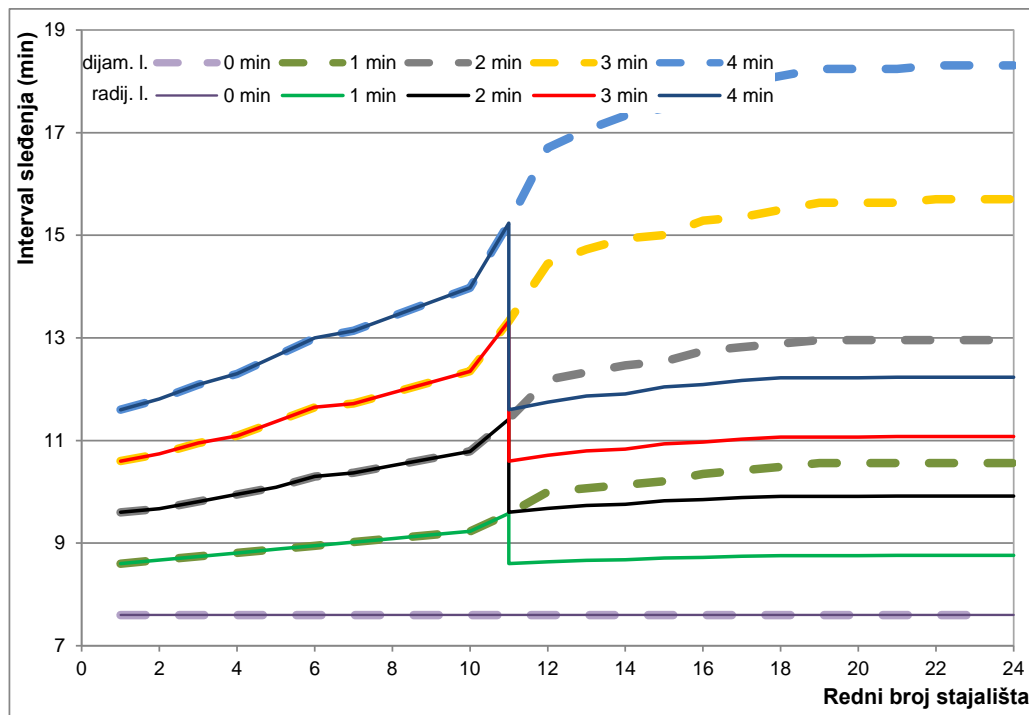
Slika 7.7 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smeru A, period 9:00–10:00



Slika 7.8 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smeru A, period 13:00–14:00



Slika 7.9 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smeru B, period 9:00–10:00



Slika 7.10 Simulirani interval sleđenja za različite veličine primarnog poremećaja – liniji broj 5, smeru B, period 13:00–14:00

### 7.3 EVALUACIJA RAVNOMERNOSTI INTERVALA SLEĐENJA (III faza)

U ovom poglavlju predstavljena je evaluacija stepena ravnornosti intervala sleđenja vozila na liniji za izvršenu optimizaciju. Evaluacija je izvršena za različite kombinacije vrednosti primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila. Iste veličine primarnog poremećaja intervala sleđenja su korišćene za dijametralnu i prvu radijalnu liniju, dok su vrednosti primarnog poremećaja intervala na drugoj radijalnoj liniji varirane u definisanim granicama.

Parametrom PRDM je iskazan procenat pravilnosti devijacije intervala sleđenja. Vrednosti PRDM bliske nuli pokazuju idealno stanje ravnornosti, a vrednosti bliske jedinici predstavljaju grupisanje vozila. Na graficima su date prosečne vrednosti parametra PRDM za sva stajališta duž linije.

Evaluacija ravnornosti intervala sleđenja u ovom radu je izvršena upoređivanjem ravnornosti intervala dve varijante (postojeći i optimizovan način organizacije), pa su na graficima označena tri područja:

- područje OPTIMALNE ravnornosti,
- područje DOBRE ravnornosti,
- područje LOŠE ravnornosti.

Granice područja su određene na osnovu idealnih slučajeva stepena ravnornosti intervala sleđenja za postojeće uslove funkcionisanja linije (k-ke kretanja putnika, intenzitet ulaska putnika, i dr.).

Područje OPTIMALNE ravnornosti je na grafiku predstavljeno zelenom bojom (Slika 7.11 – Slika 7.18). Gornja granica područja OPTIMALNE ravnornosti odgovara situaciji kada se na drugoj radijalnoj liniji prevoz realizuje bez primarnog poremećaja. Kod optimizovanog načina organizacije, primarni poremećaj ima uticaj samo na prvu radijalnu liniju, jer je širenje poremećaja prekinuto podelom linije. Na drugoj radijalnoj liniji uticaj primarnog poremećaja ne postoji. Druga radijalna linija tada funkcioniše bez poremećaja, odnosno tada optimizovan način organizacije dostiže optimalan stepen ravnornosti i to je gornja granica područja OPTIMALNE ravnornosti.

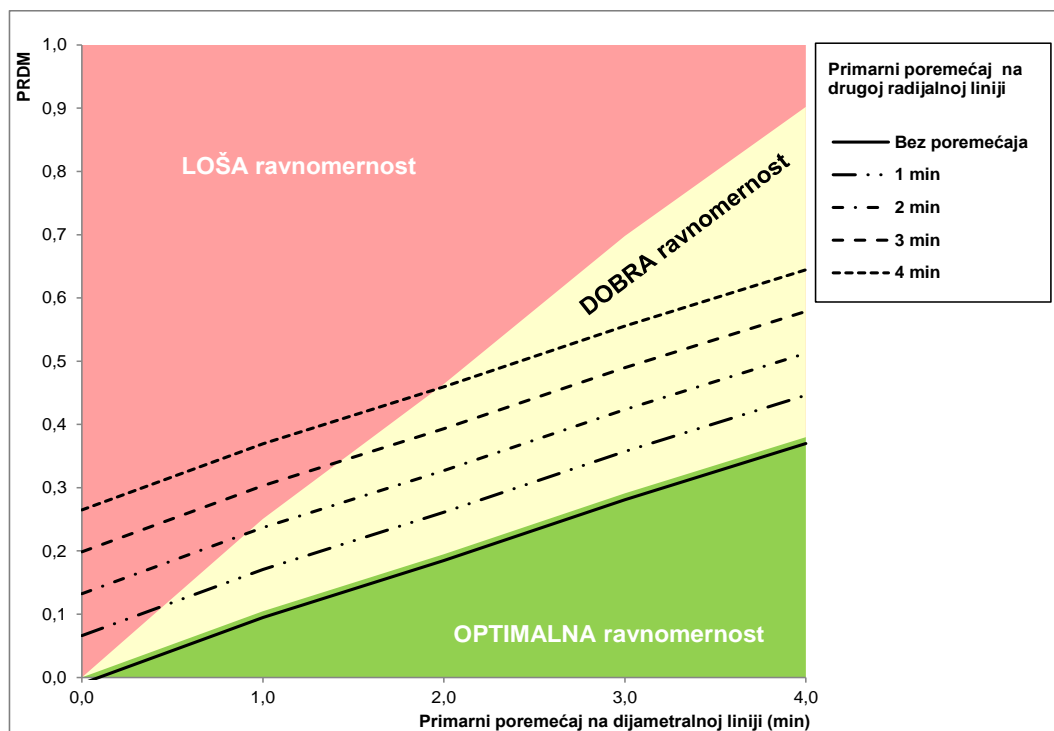
Područje DOBRE ravnornosti je na grafiku predstavljeno žutom bojom. Donja granice područja DOBRE ravnornosti je definisana stanjem optimalne ravnornosti linije. Gornja granica područja DOBRE ravnornosti je definisana stepenom ravnornosti koja se ostvaruje na dijametralnoj liniji u postojećem načinu funkcionisanja.

Područje LOŠE ravnornosti je na grafiku označeno crvenom bojom i predstavlja stanje ravnornosti koje je lošije u odnosu na postojeći način funkcionisanja linije (dijametralna linija).

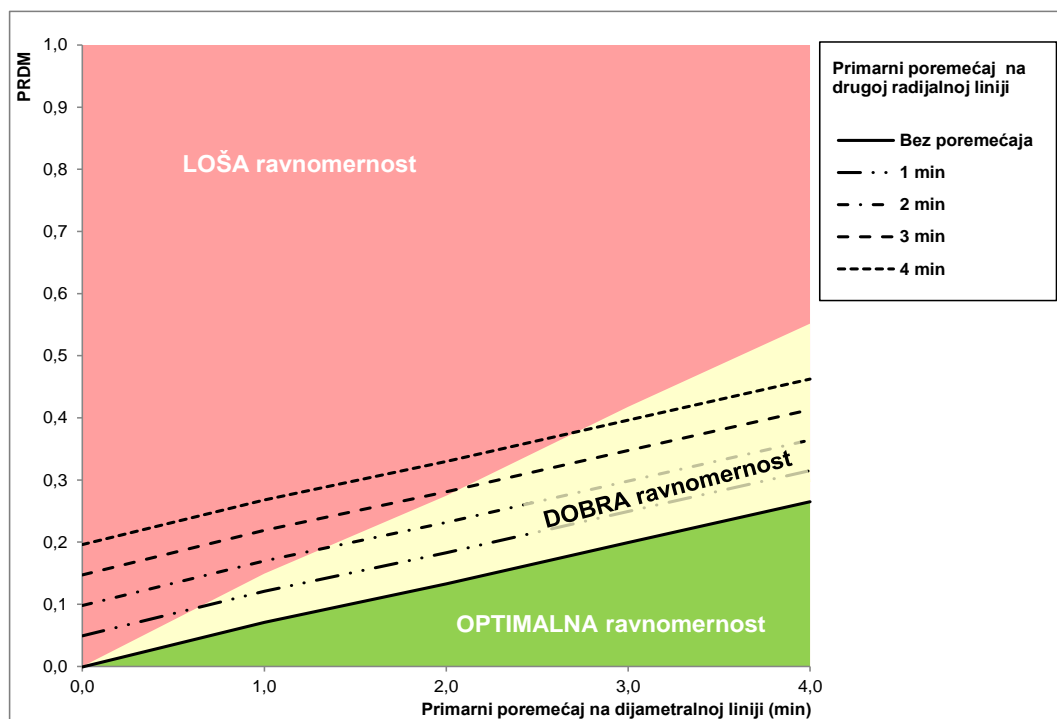
Na graficima (Slika 7.11 – Slika 7.18), x-osa predstavlja primarni poremećaj intervala sleđenja u postojećem načinu organizacije (na dijametralnoj/prvoj radijalnoj liniji), a y-osa ostvarene vrednosti PRDM-a za nastali primarni poremećaj. Puna linija na graficima (Slika 7.11 – Slika 7.18) označava stanje optimizovane varijante, kada je druga radijalna linija bez poremećaja, a isprekidane linije predstavljaju stanje optimizovane varijante kada se na drugoj radijalnoj liniji dogodi primarni poremećaj (1, 2, 3 ili 4 minuta).

Na graficima (Slika 7.11 – Slika 7.18) su predstavljeni rezultati evaluacije. Poboljšanje stepena ravnornosti intervala je postignuto na obe linije u svakom periodu. U zavisnosti od smera linije i primenjenog perioda zavise efekti optimizacije. Najveća poboljšanja ravnornosti se postižu u vršnim periodima kada su intervali sleđenja najmanji, a broj ulazaka putnika po stajalištima najveći. Od raspodele broja ulazaka putnika duž linije takođe zavise efekti optimizacije.

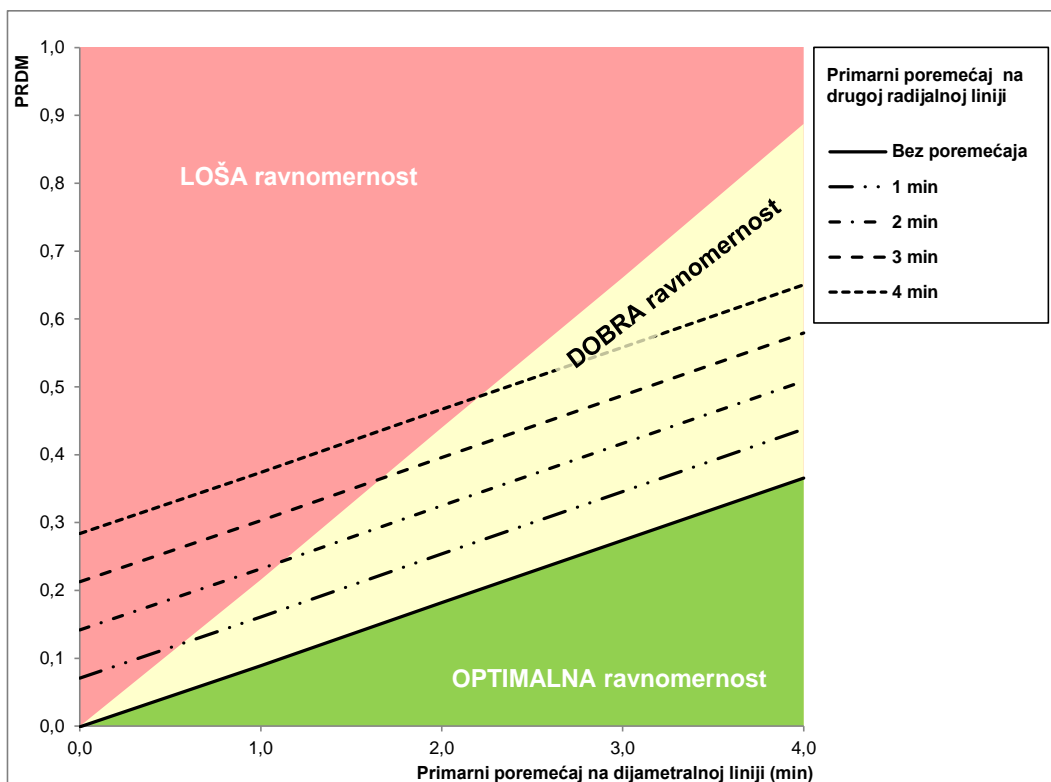
Efekti optimizacije zavise i od veličine primarnog poremećaja na drugoj radijalnoj liniji. Uopšteno posmatrano, sa grafika se može videti da se DOBRA ravnornost postiže uvek kada primarni poremećaj na drugoj radijalnoj liniji nije duplo veći u odnosu na primarni poremećaj u postojećem načinu organizacije.



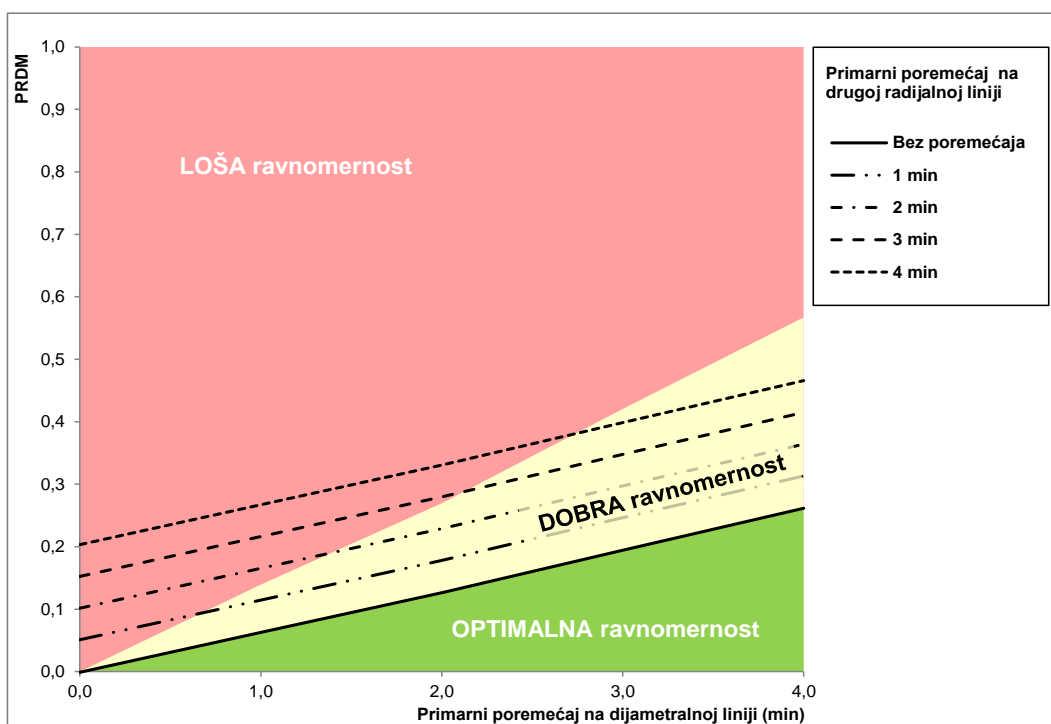
Slika 7.11 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer A, 13-14h



Slika 7.12 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer A, 9-10h

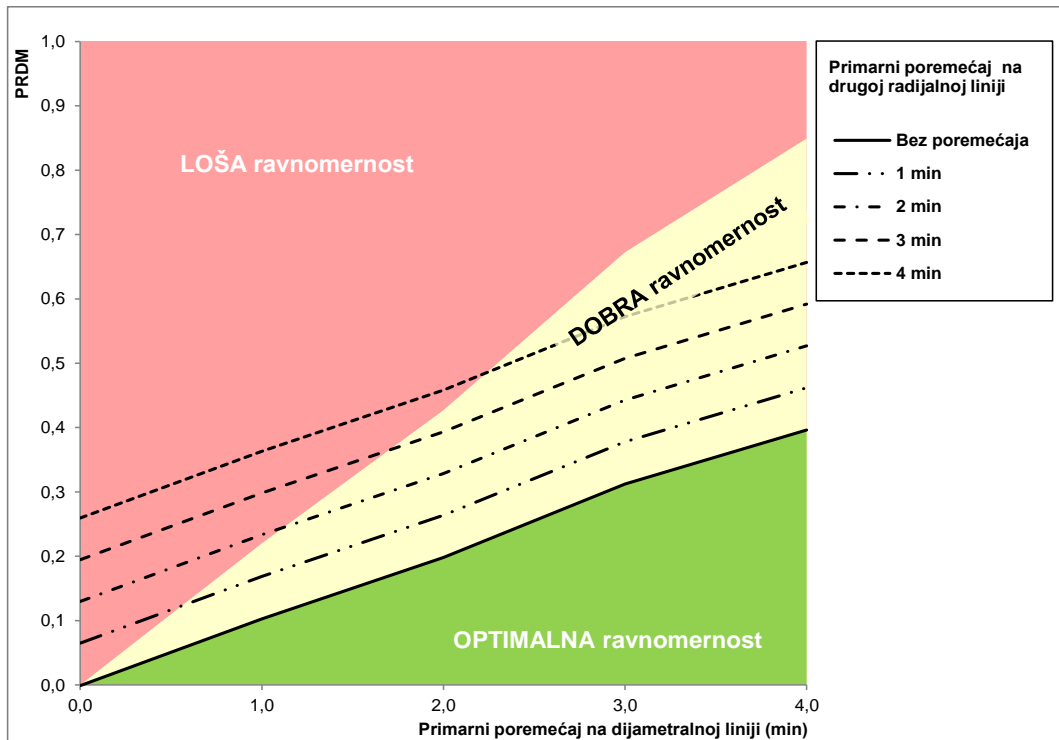


Slika 7.13 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer B, 13-14h

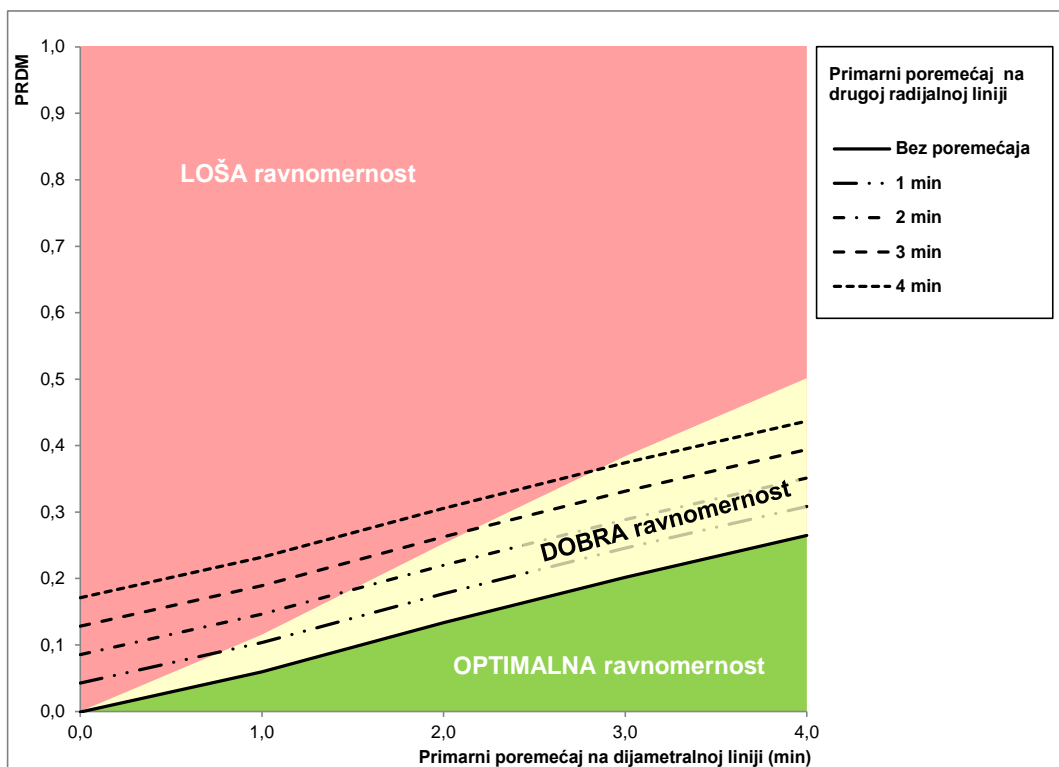


Slika 7.14 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 3, smer B, 9-10h

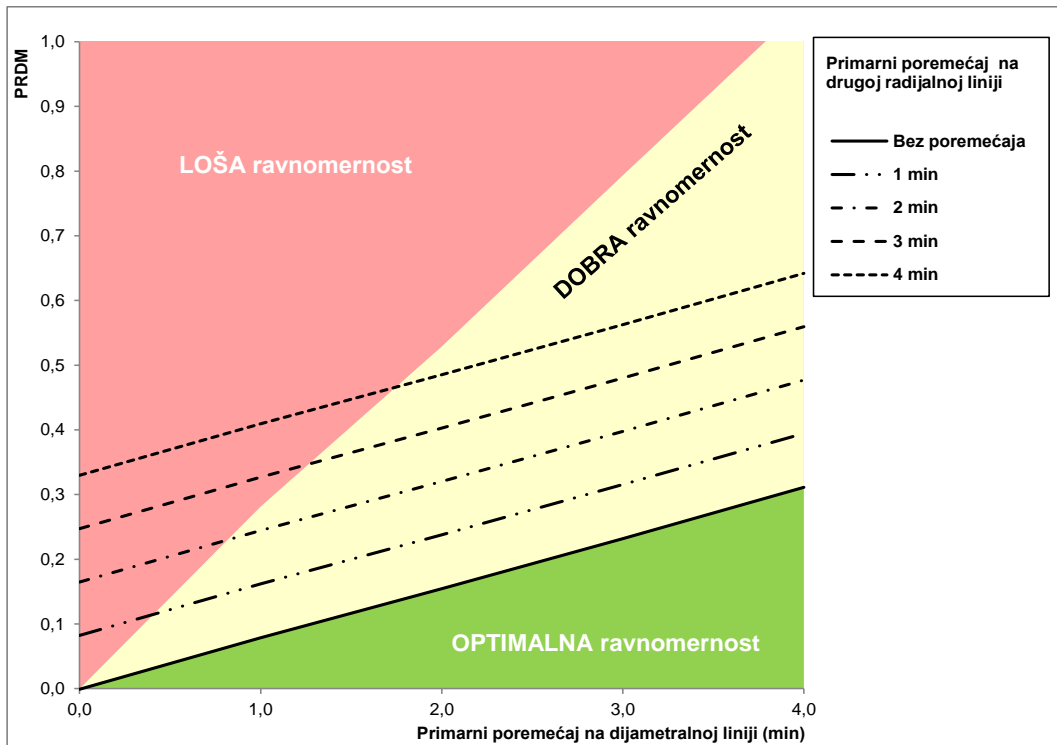




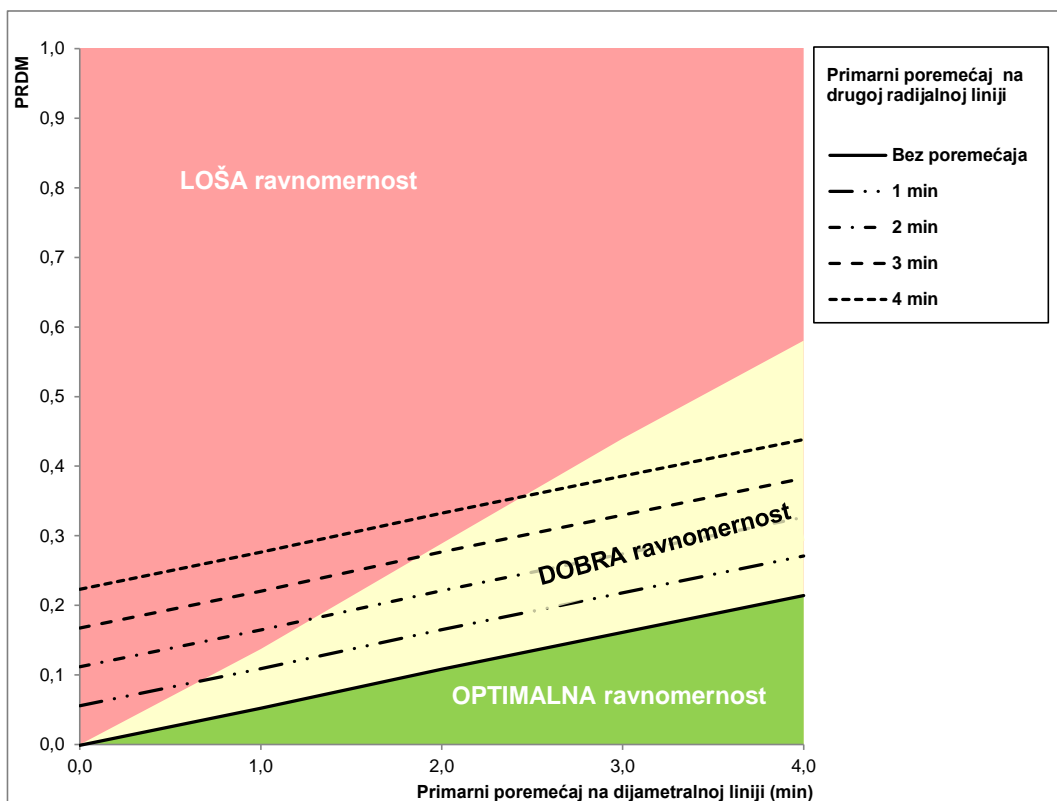
Slika 7.15 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer A, 13-14h



Slika 7.16 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer A, 9-10h



Slika 7.17 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer B, 13-14h



Slika 7.18 Stepen ravnomernosti intervala sleđenja nakon optimizacije - L 5, smer B, 9-10h

## 7.4 EVALUACIJA VREMENA BORAVKA PUTNIKA U SISTEMU (IV faza)

U ovom poglavlju predstavljena je evaluacija vremena boravka putnika u sistemu na liniji za izvršenu optimizaciju. Evaluacija je izvršena za različite kombinacije vrednosti primarnog poremećaja intervala sleđenja na dijametralnoj liniji (prvoj radijalnoj) i vrednosti primarnog poremećaja intervala na drugoj radijalnoj liniji. Evaluacija vremena boravka putnika u sistemu je izvršena na osnovu:

- srednjeg vremena čekanja putnika na stajalištu,
- srednjeg vremena presedanja putnika,
- srednjeg vremena boravka putnika u sistemu.

### 7.4.1 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu

Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu predstavlja prosečan vremenski period koji putnik provede čekajući vozilo na stajalištu. Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu za potrebe evaluacije utvrđeno je kao prosečna vrednost za sve putnike na istraživanoj liniji.

Evaluacija srednjeg vremena čekanja putnika na stajalištu u ovom radu je izvršena upoređivanjem srednjeg vremena čekanja putnika u dve varijante (postojeći i optimizovan način organizacije), pa su na graficima (Slika 7.19 – Slika 7.26) označena tri područja: područje OPTIMALNOG vremena čekanja, područje SKRAĆENOG vremena čekanja, područje PRODUŽENOG vremena čekanja. Granice područja su određene na osnovu idealnih slučajeva srednjeg vremena čekanja putnika na stajalištu za postojeće uslove funkcionisanja linije.

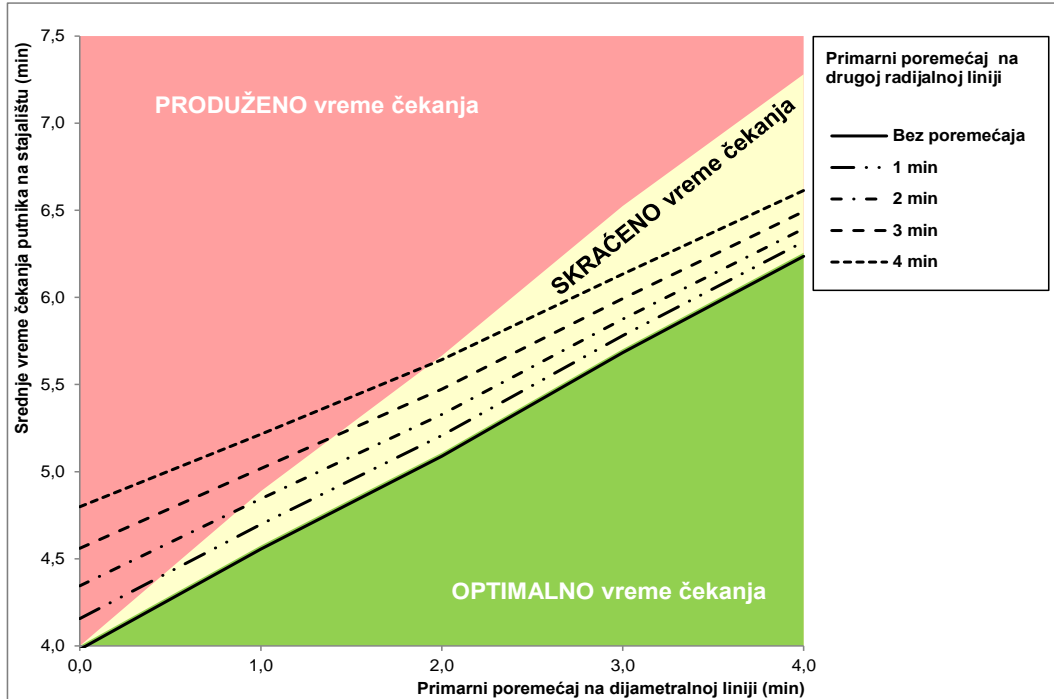
Područje OPTIMALNOG vremena čekanja je na graficima predstavljeno zelenom bojom (Slika 7.19 – Slika 7.26). Gornja granica područja OPTIMALNOG vremena čekanja se dostiže kada druga radijalna linija funkcioniše bez poremećaja.

Područje SKRAĆENOG vremena čekanja je na grafiku predstavljeno žutom bojom. Donja granica područja SKRAĆENOG vremena čekanja je definisana vrednostima optimalnog srednjeg vremenom čekanja na liniji, a gornja granica je definisana srednjim vremenom čekanja putnika na stajalištu koje se ostvaruje u postojećem načinu funkcionisanja.

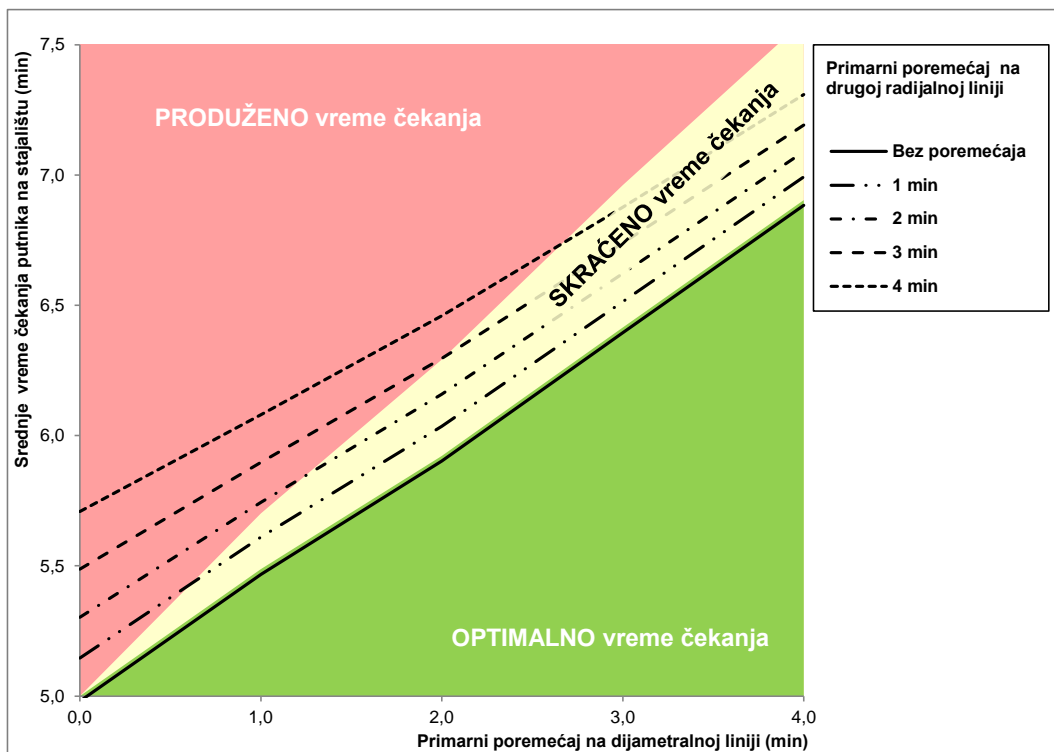
Područje PRODUŽENOG vremena čekanja je na grafiku označeno crvenom bojom i predstavlja srednje vreme čekanja putnika na stajalištu koje je lošije u odnosu na postojeći način funkcionisanja linije.

Na graficima (Slika 7.19 – Slika 7.26), x-osa predstavlja primarni poremećaj intervala sleđenja u postojećem načinu organizacije (na dijametralnoj / prvoj radijalnoj liniji), a y-osa ostvarene vrednosti srednjeg vremena čekanja na stajalištu za nastali primarni poremećaj. Puna linija na graficima (Slika 7.19 – Slika 7.26) označava stanje optimizovane varijante, kada je druga radijalna linija bez poremećaja, a isprekidane linije predstavljaju stanje optimizovane varijante kada se na drugoj radijalnoj liniji dogodi primarni poremećaj (1, 2, 3 ili 4 minuta).

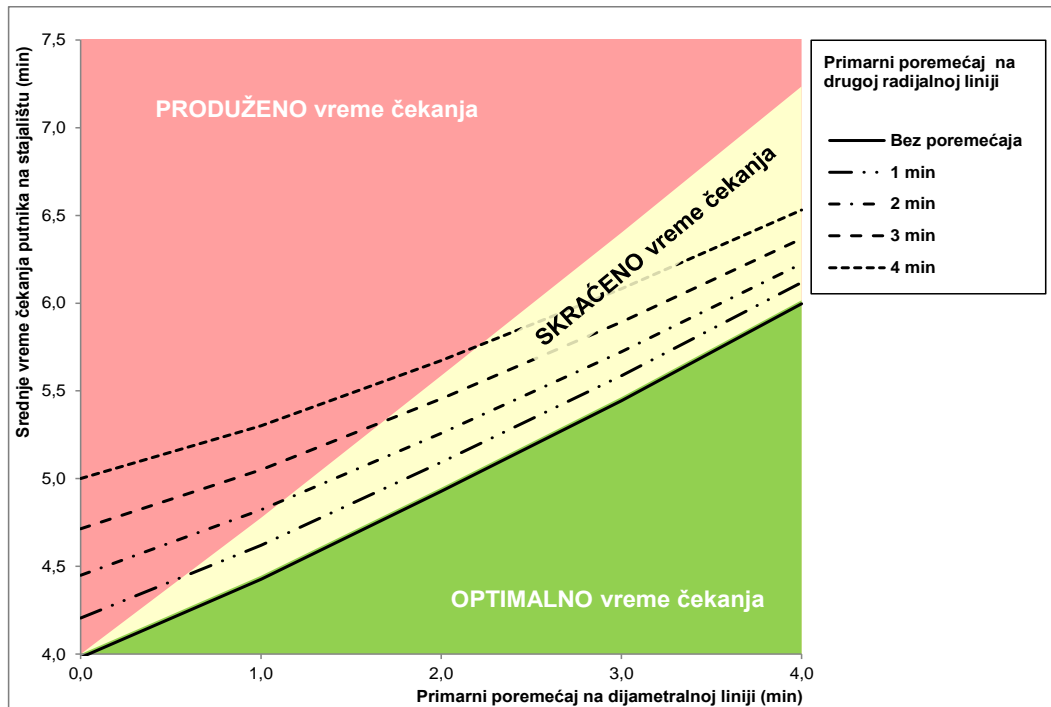
Na graficima koji slede su predstavljeni rezultati evaluacije. Nakon optimizacije, kraće vreme čekanja je postignuto na obe linije za sve kombinacije, pri čemu se efekti optimizacije povećavaju sa rastom primarnog poremećaja na dijametralnoj liniji. Budući da je područje SKRAĆENOG vremena čekanja najuže u vanvršnim periodima (najveći interval, najmanji broj putnika) onda su i efekti optimizacije u datim periodima najmanji.



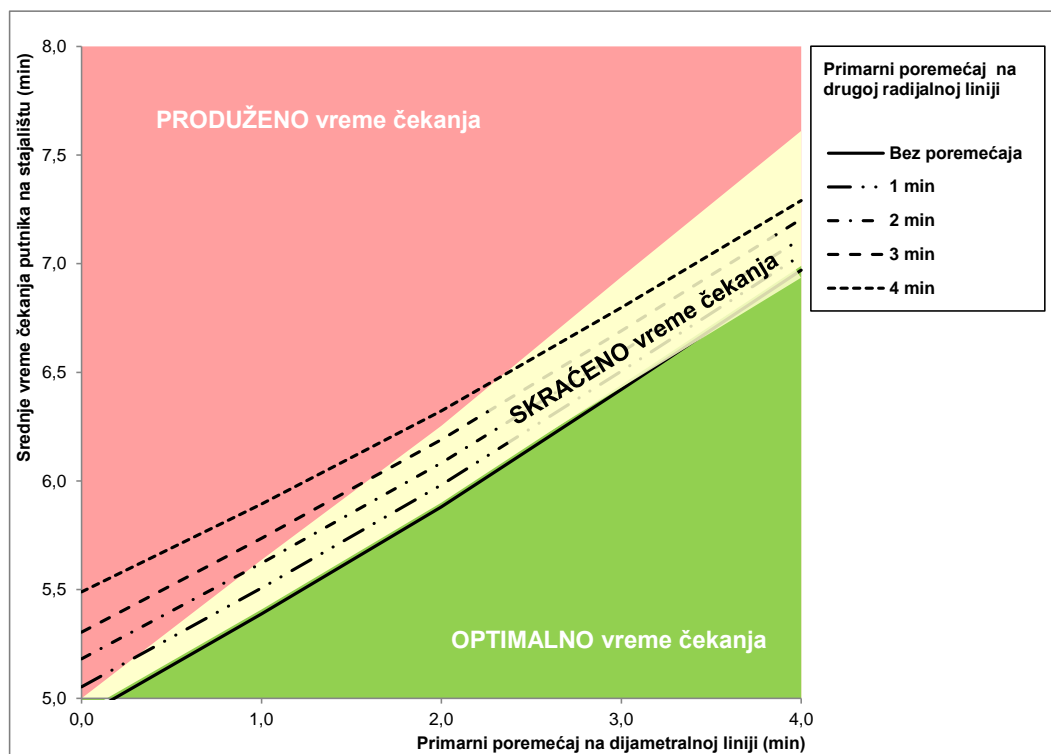
Slika 7.19 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer A, 13-14h



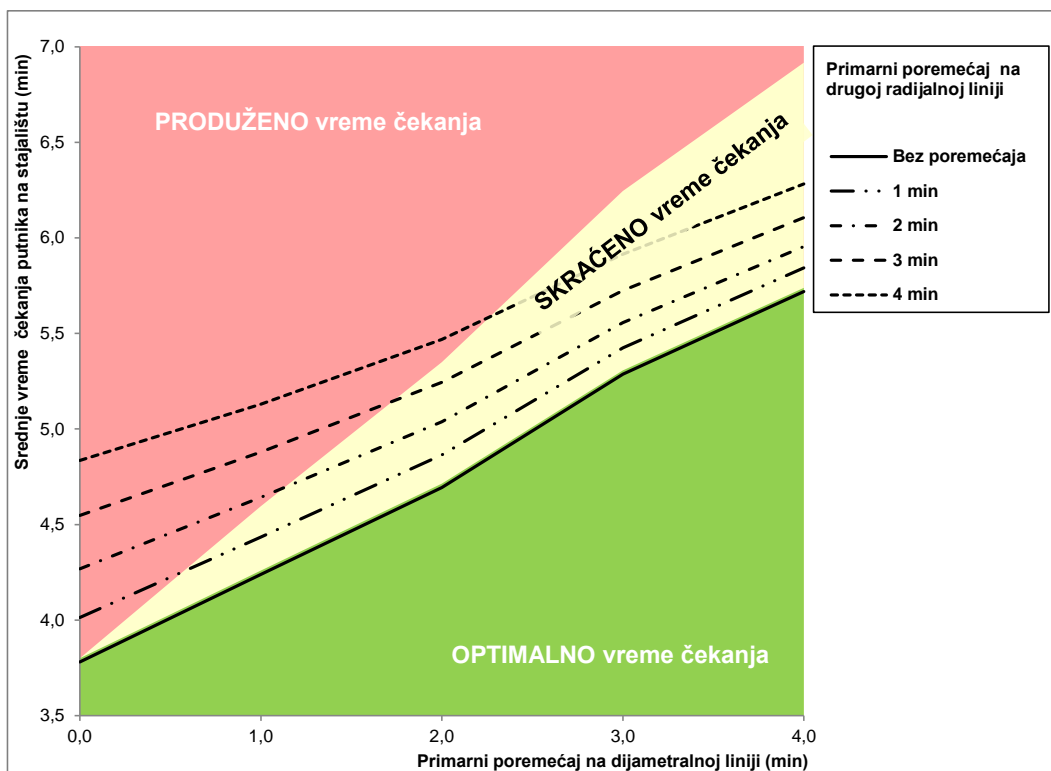
Slika 7.20 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer A, 9-10h



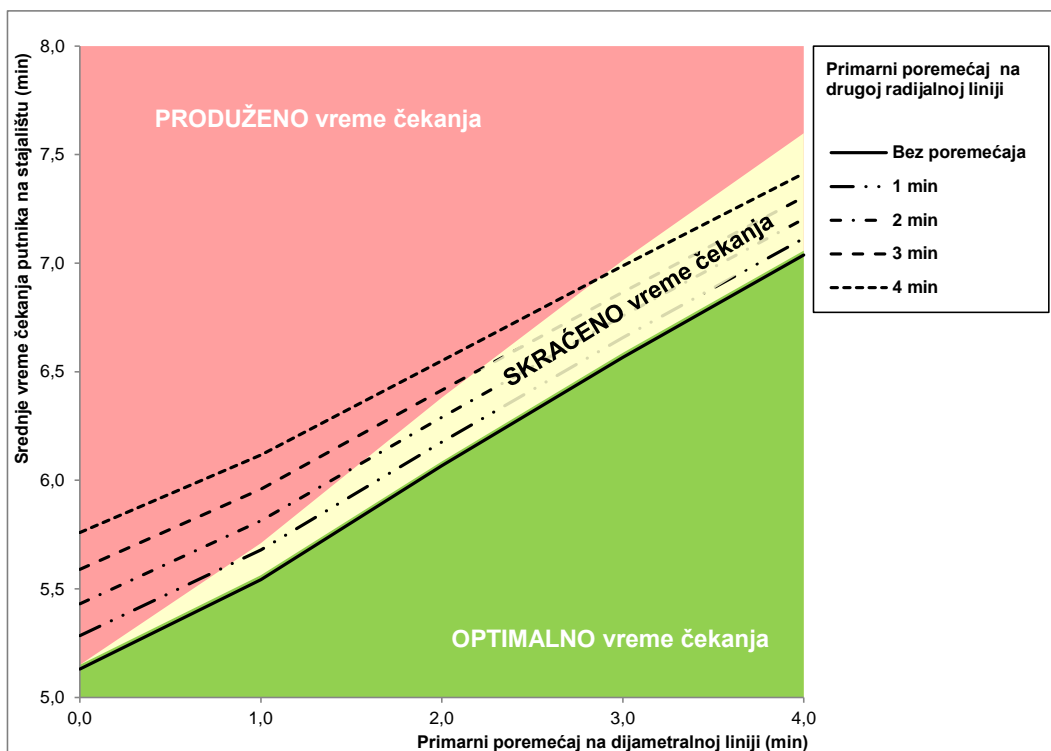
Slika 7.21 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer B, 13-14h



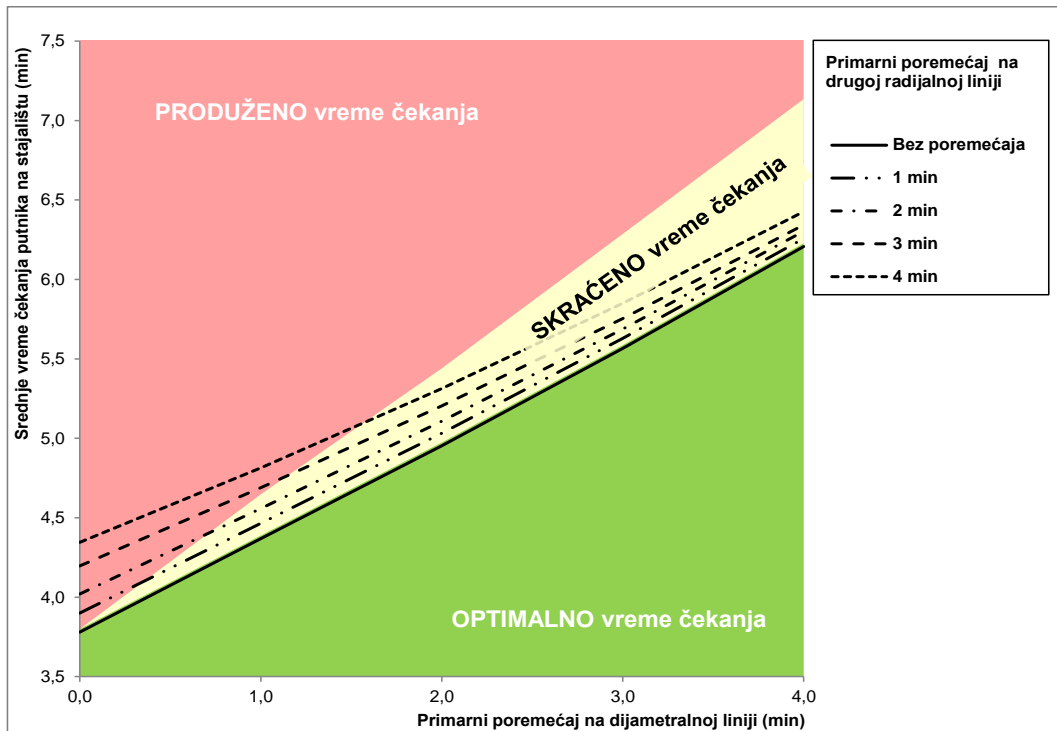
Slika 7.22 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 3, smer B, 9-10h



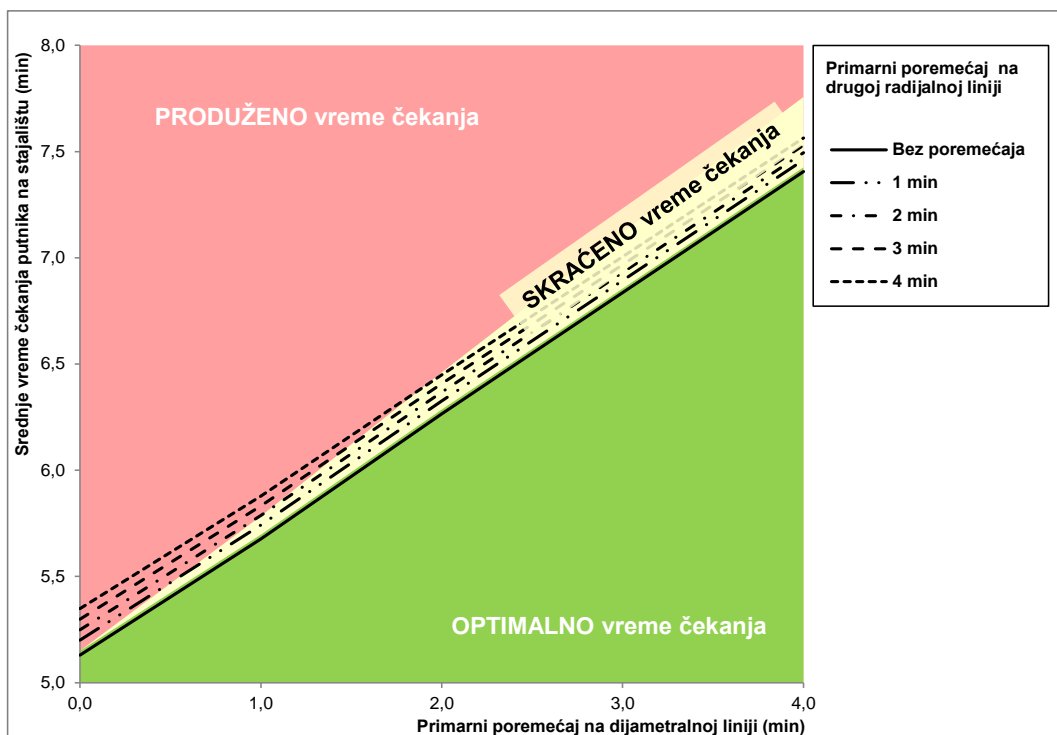
Slika 7.23 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer A, 13-14h



Slika 7.24 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer A, 9-10h



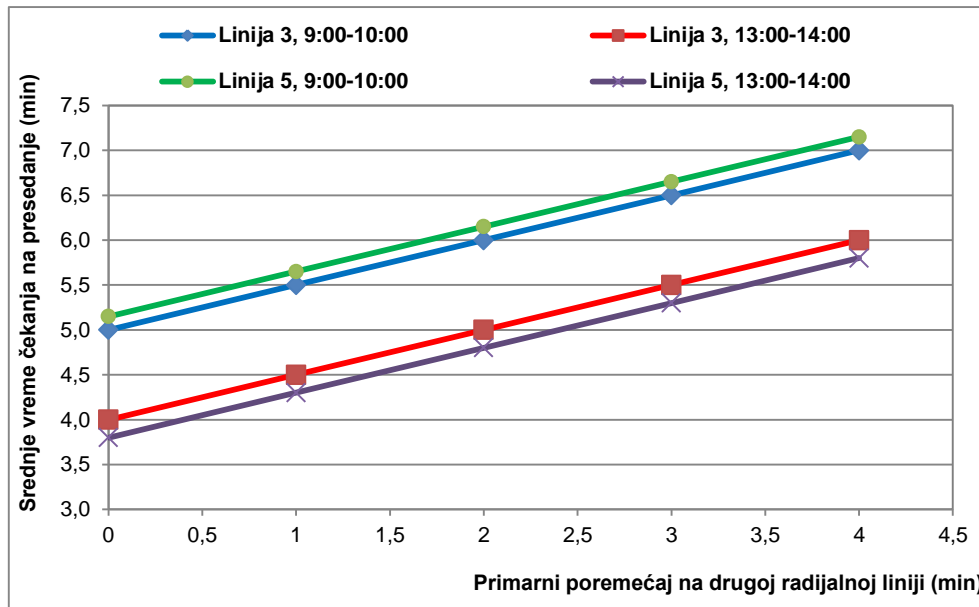
Slika 7.25 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer B, 13-14h



Slika 7.26 Srednje vreme čekanja putnika na stajalištu - L 5, smer B, 9-10h

### 7.4.2 Srednje vreme presedanja

Nakon optimizacije putnici koji prelaze tačku podele linije moraju da presedaju. Budući da ne postoji koordinacija polazaka, srednje vreme presedanja putnika zavisi isključivo od intervala sleđenja druge radijalne linije kao i poremećaja intervala u polasku druge radijalne linije. Na slici 7.27 je prikazana zavisnost srednjeg vremena presedanja putnika u odnosu na primarni poremećaj za istraživane linije.



Slika 7.27 Srednje vreme presedanja putnika nakon optimizacije

### 7.4.3 Vreme boravka putnika u sistemu

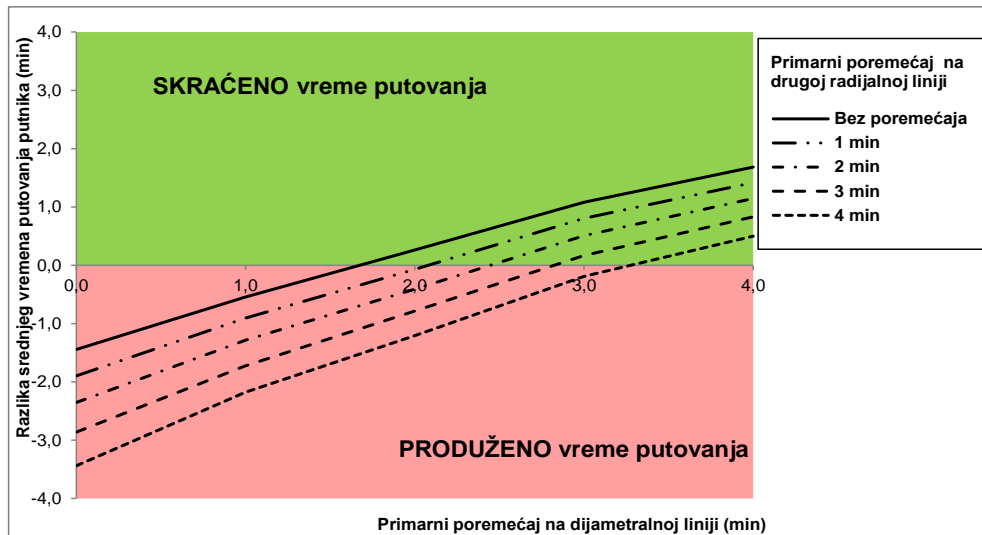
Vreme boravka putnika u sistemu obuhvata vremenski period od dolaska putnika na stajalište do trenutka izlaska putnika iz vozila. Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu definisano je kao razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu za postojeći način organizacije prevoza i za optimizovan način organizacije prevoza. Kada je razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu veća od nule tada se u optimizovanom načinu organizacije putnici zadržavaju kraće u odnosu na postojeće stanje.

Budući da se postupkom optimizacije trasa linije i gravitaciono područje linije nije promenilo, razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na predmetnoj liniji predstavlja i promenu u srednjem vremenu putovanja putnika. U skladu sa tim na narednim graficima su predstavljeni efekti optimizacije na srednje vreme putovanja putnika.

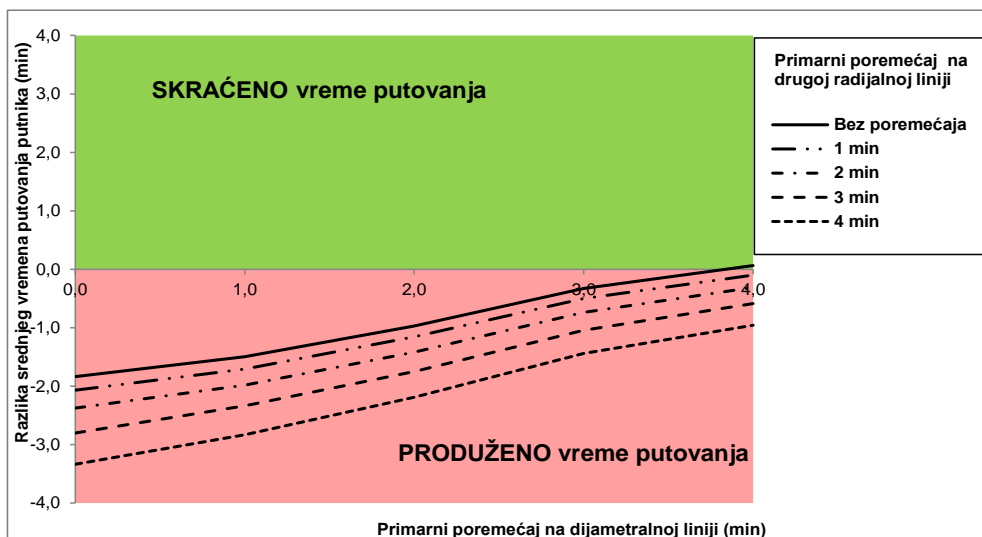
Na graficima (Slika 7.28 – Slika 7.35), x-osa predstavlja primarni poremećaj intervala sleđenja u postojećem načinu organizacije (na dijametralnoj / prvoj radijalnoj liniji), a y-osa ostvarenu razliku u vremenu putovanja putnika za nastali primarni poremećaj. Puna linija na graficima (Slika 7.28 – Slika 7.35) označava stanje optimizovane varijante, kada je druga radijalna linija bez poremećaja, a isprekidane linije predstavljaju stanje optimizovane varijante kada se na drugoj radijalnoj liniji dogodi primarni poremećaj (1, 2, 3 ili 4 minuta).



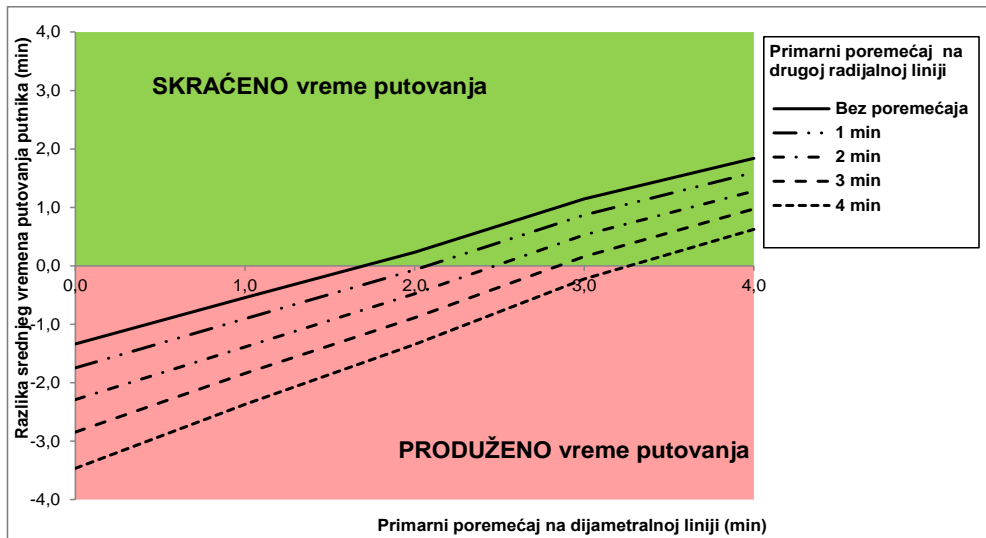
Efekti optimizacije, posmatrani kroz srednje vreme putovanja putnika, značajno se razlikuju u zavisnosti od perioda istraživanja. Za obe linije skraćenje srednjeg vremena putovanja se postiže samo u vršnim periodima kada su primarni poremećaji na dijametralnoj liniji veći do 2 minuta, izuzevši liniju 5 u smeru B gde se skraćenje postiže za poremećaje veće od jednog minuta. Na obe linije nakon optimizacije u vanvršnim periodima produžava se srednje vreme putovanja putnika. Produženo vreme putovanja je izraženo na liniji broj 5 u karakterističnom satu vanvršnog perioda.



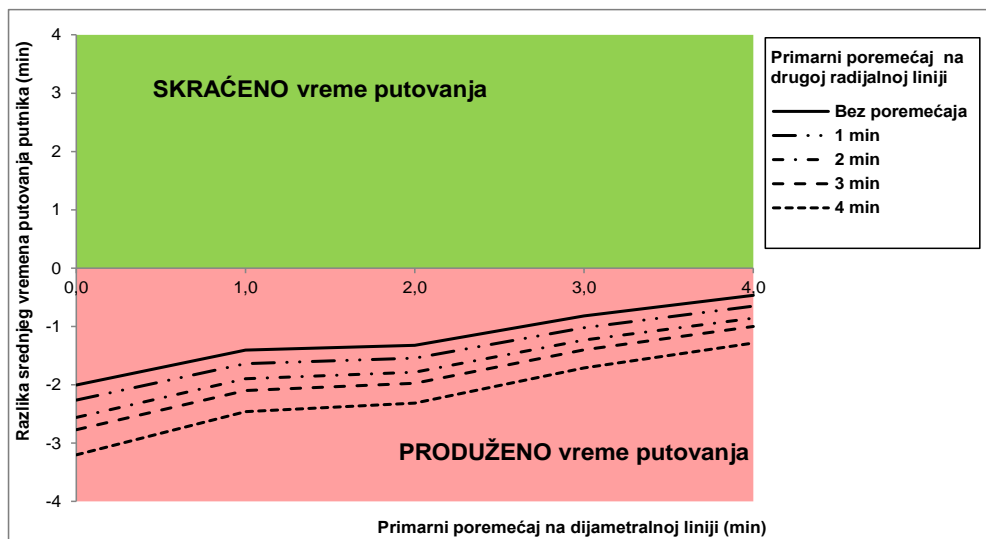
Slika 7.28 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer A, 13-14h



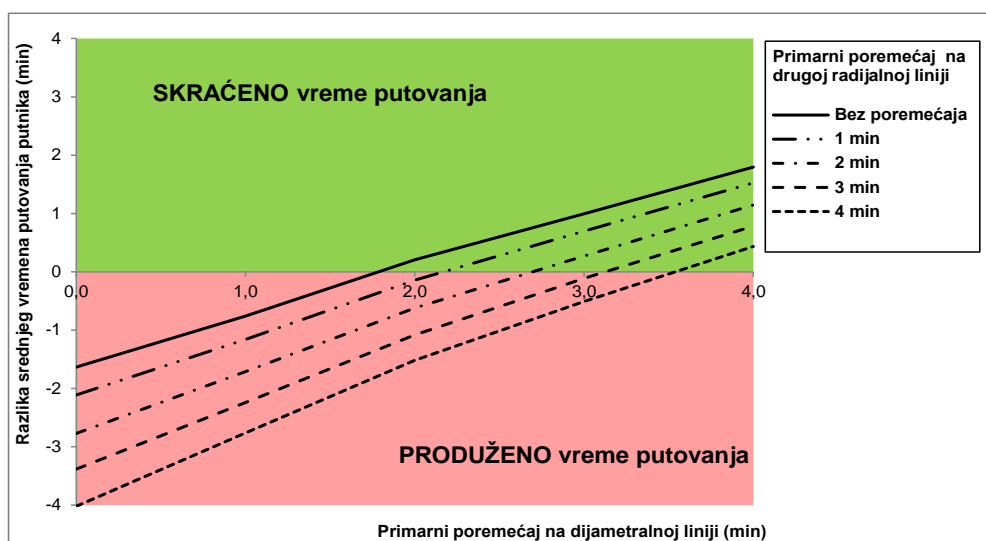
Slika 7.29 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer A, 9-10h



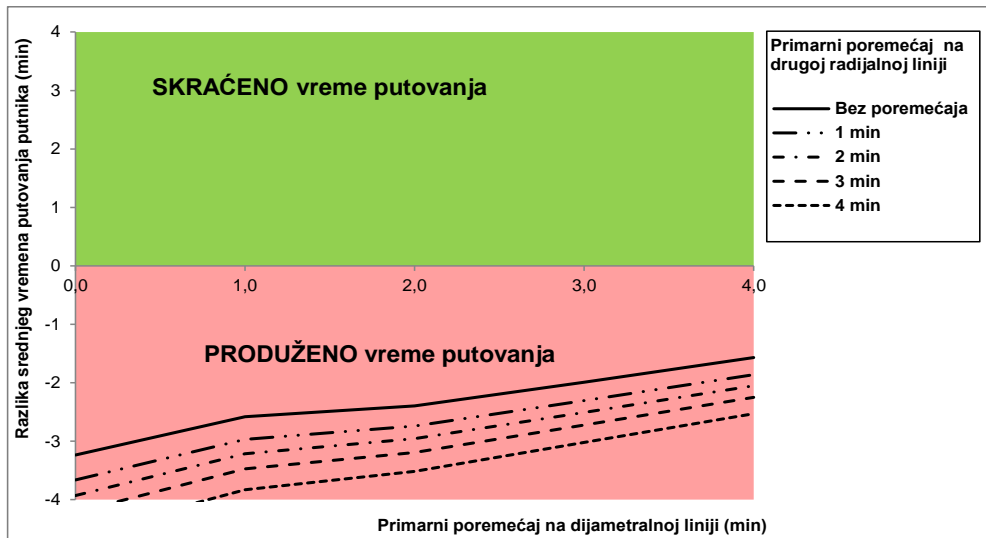
Slika 7.30 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer B, 13-14h



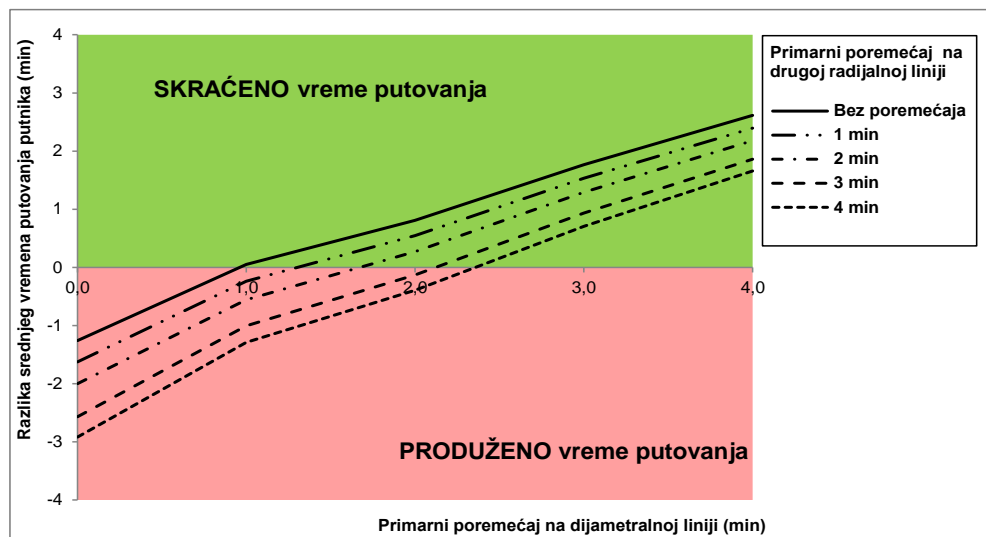
Slika 7.31 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 3, smer B, 9-10h



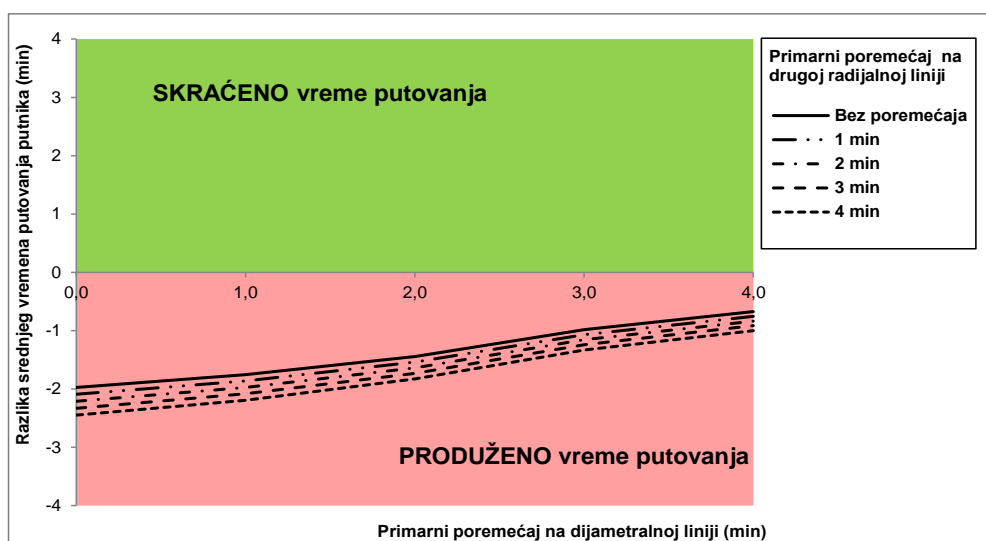
Slika 7.32 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer A, 13-14h



Slika 7.33 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer A, 9-10h



Slika 7.34 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer B, 13-14h



Slika 7.35 Razlika srednjeg vremena boravka putnika u sistemu na liniji broj 5, smer B, 9-10h

## **8 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA**

Visok stepen zadovoljstva putnika i konkurentnost sistema JGPP-a postiže se isključivo visokim kvalitetom usluge JGPP-a. Visok kvalitet usluge u javnom prevozu podrazumeva između ostalog da korisnici doživljavaju kratko vreme čekanja na stajalištu, kratko vreme vožnje i minimum standarda komfora. Osnovna karakteristika gradskih linija sa zavidnim kvalitetom usluge je visoka frekvencija vozila, koja obezbeđuje korisnicima kraće vreme čekanja na stajalištima i veće prevozne brzine. Međutim, operativno funkcionisanje sistema u uslovima visoke frekvencije je otežano. Tokom operativnog funkcionisanja sistema usled delovanja različitih faktora javljaju se učestale varijacije u vremenu kretanja vozila duž linije. Nastale varijacije narušavaju ravnomernost intervala sleđenja, pri čemu u ekstremnim situacijama dolazi do grupisanja vozila. Loša ravnomernost intervala sleđenja negativno utiče na kvalitet usluge, ali i na operativno funkcionisanje sistema.

Na osnovu izvršenog pregleda dostupne literature zaključuje se da je najčešći način za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja zadržavanje vozila javnog prevoza na određenim kritičnim tačkama. Osnovni cilj zadržavanja vozila je formiranje sličnih intervala sleđenja ispred i iza svakog vozila. Međutim ovakav i slični načini optimizacije operativnog funkcionisanja sistema JGPP-a mogu značajno da produže zadržavanja vozila i povećaju vreme putovanja korisnika.

Prema nastanku, poremećaji intervala sleđenja su klasifikovani na: (I) primarne poremećaje - izvorno nastali pod uticajem različitih faktora, i (II) sekundarne poremećaje - nastaju kao posledica širenja i slaganja primarnih poremećaja. Ovaj rad se nije bavio uzrocima nastanka primarnih poremećaja intervala sleđenja, već fenomenom širenja i slaganja poremećaja na jednoj liniji JGPP-a visoke frekvencije, kao i formiranjem mera i strategija za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila.

Izvršenom detaljnom analizom procesa koji se odvijaju tokom kretanja vozila na liniji, identifikovani su uticajni parametri, kao i njihove veze i zakonitosti u procesu kumuliranja i slaganja poremećaja intervala sleđenja vozila. U skladu sa definisanim pretpostavkama modela, procesi koji određuju zadržavanje vozila na stajalištima prepoznati su kao procesi koji utiču na širenje i kumuliranje poremećaja intervala sleđenja vozila. Identifikovani uticajni parametri su: intenzitet nakupljanja putnika na stajalištu, intenzitet ulaska putnika u vozilo, broj stajališta po redu u odnosu na lokaciju stajališta primarnog poremećaja ( $s$ ), broj vozila po redu vožnje u odnosu na vozilo sa primarnim poremećajem ( $k$ ), i veličina primarnog poremećaja intervala sleđenja vozila. Na osnovu utvrđenih zakonitosti razvijen je analitičko-deterministički model kojim se definiše širenje i slaganje većeg broja poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu, na osnovu veličine i pozicije primarnih poremećaja i bazičnih parametara koji određuju vreme zadržavanja vozila na stajalištu. Razvijeni model se odnosi isključivo na gradske linije javnog prevoza koje funkcionišu u uslovima visoke frekvencije, gde se nakupljanje putnika vrši nezavisno od reda vožnje.

Formiranjem modela potvrđena je prva osnovna hipoteza rada, prema kojoj je, za slučaj postojanja većeg broja primarnih poremećaja intervala sleđenja vozila na različitim polascima u sistemu JGPP-a, moguće definisati širenje poremećaja intervala sleđenja vozila u sistemu, na osnovu veličine i pozicije primarnih poremećaja i bazičnih parametara koji određuju vreme zadržavanja vozila na stajalištu. Formiran deterministički model ima univerzalnu primenu za sve linijske podsisteme.

Na osnovu izvršene matematičke analize razvijenog modela sagledan je pojedinačan uticaj parametara na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila, pri čemu su dobijeni sledeći rezultati:

- Zavisnost između veličine primarnog poremećaja intervala i veličine sekundarnog poremećaja intervala sleđenja vozila je linearna,
- Veličina sekundarnog poremećaja intervala sleđenja vozila kao funkcija  $h(s,k,\beta)$  može biti pozitivna ili negativna i definisana je na skupu realnih brojeva,
- Funkcija poremećaja intervala sleđenja  $h(s,k,\beta)$  nad domenom definisanosti za neparne polaske vozila je monotono rastuća, dok za parne polaske vozila je monotono opadajuća (polazak vozila sa primarnim poremećajem je prvi polazak u modelu),
- Parametar  $\beta$  (kao odnos intenziteta nakupljanja i intenziteta ulaska putnika u vozilo) utiče pozitivno na priraštaj funkcije  $h(s,k,\beta)$  po stajalištima duž linije,
- Broj vozila po redu vožnje u odnosu na vozilo sa primarnim poremećajem, menja predznak funkcije  $h(s,k,\beta)$  i utiče pozitivno na priraštaj  $h(s,k,\beta)$  po stajalištima duž linije,
- Visok stepen priraštaja funkcije  $h(s,k,\beta)$  po stajalištima duž linije dovodi sistem u nekontrolisano stanje, praćeno grupisanjem vozila na liniji,
- Intenzitet sekundarnog poremećaja intervala sleđenja vozila slabi prilikom prelaska na sledeće vozilo,

- Ukoliko se ne dostignu vrednosti kritičnog priraštaja funkcije  $h(s,k,\beta)$  sistem ima tendenciju da se smiri.

Na osnovu dobijenih rezultata analize uticaja pojedinačnih parametara na širenje poremećaja, zaključeno je sledeće:

- Širenje poremećaja intervala sleđenja vozila rezultat je složenog dejstva većeg broja parametara, odnosno posmatranjem uticaja samo jednog parametra ne dobija se realna slika o širenju poremećaja,
- Dominantni parametri su: broj stajališta po redu u odnosu na lokaciju stajališta primarnog poremećaja i parametar  $\beta$ ,
- Rastom intenziteta nakupljanja putnika u odnosu na intenzitet ulaska putnika u vozilo, raste i osetljivost sistema javnog prevoza na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila,
- Veći broj stajališta na liniji stvara veću mogućnost za kumuliranje poremećaja i dostizanje nekontrolisanog stanja sistema,
- Širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu osetljivije je na promenu parametra  $\beta$  nego na broj stajališta na liniji,
- U fazi projektovanja sistema u velikoj meri je moguće uticati na sekundarne poremećaje intervala sleđenja.

U ovom radu sistem JGPP-a sagledan je kroz dva nivoa: planski nivo i operativni nivo. Planski nivo obuhvata faze projektovanja elemenata sistema, a operativni nivo podrazumeva stvarne procese na terenu, koji obezbeđuju uslugu korisnicima u vremenu i prostoru.

U skladu sa zaključcima analize modela, u ovom radu je razvijen postupak optimizacije statičkih elemenata linije u cilju povećanja otpornosti sistema na širenje poremećaja. Naime, razvijen je postupak optimizacije kojim se sa aspekta vremena boravka putnika u sistemu i dostignute ravnomernosti intervala sleđenja, vrednuje podela dijametralne linije na dve radijalne.

Da bi predložena optimizacija pozitivno uticala i na krajnji kvalitet usluge koji sistem treba da pruži putniku, postupak optimizacije morao je da ispuni tri cilja: povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila, praktičnu primenljivost postupka, i očuvanje postojećeg kvaliteta usluge. Razvijeni postupak optimizacije kombinuje realno utvrđene karakteristike kretanja putnika na liniji i simulacije širenja poremećaja intervala sleđenja duž linije, a odnosi se na dijametralne linije javnog gradskog prevoza putnika, gde se prevoz realizuje sa intervalima manjim od 15 minuta. Razvijeni postupak optimizacije sastoji se iz četiri faze, pri čemu izlazne vrednosti iz jedne faze predstavljaju ulaz u narednu. Faze postupka optimizacije su: (I) Podela dijametralne linije, (II) Simulacija širenja poremećaja intervala sleđenja, (III) Evaluacija ravnomernosti intervala sleđenja i (IV) Evaluacija vremena boravka putnika u sistemu.

Vrednovanje podele dijametralne linije na dve radijalne vrši se na osnovu ravnomernosti intervala sleđenja, prosečnog vremena čekanja putnika na stajalištu, vremena presedanja putnika i dodatnog vremena boravka putnika u sistemu.

Osnovne prednosti razvijenog postupka optimizacije su:

- Razvijeni postupak predstavlja jednostavan inženjerski alat za unapređenje pouzdanosti usluge ili pomoćni alat kod redefinisivanja mreže linija,
- Potrebni podaci za razvijeni postupak ne iziskuju specijalna istraživanja u sistemu JGPP-a, osim klasičnog brojanja putnika duž cele linije u željenom vremenskom periodu,
- Univerzalnost – mogućnost primene razvijenog postupka u svim linijskim podsistemima JGPP-a u skladu sa ograničenjima postupka.

Osnovni uočeni nedostatak razvijenog postupka optimizacije je ograničena primena samo na dijametralne linije visoke frekvencije.

Da bi se izvršila praktična primena razvijenog postupka optimizacije u realnim uslovima, sprovedena su istraživanja karakteristika sistema JGPP-a u Novom Sadu. Istraživanja su obuhvatila prikupljanje podataka o statičkim i dinamičkim elementima linija, karakteristikama kretanja putnika duž linija i intenzitetima ulazaka putnika u vozilo. Podaci o projektovanim statičkim i dinamičkim elementima linija preuzeti su od institucije zadužene za upravljanje i organizovanje sistema JGPP-a u Novom Sadu. Karakteristike kretanja putnika duž linije i karakteristike realizovanih dinamičkih elemenata linija preuzeti su iz studije „Sistemska-generalno brojanje i anketa putnika u javnom gradskom i prigradskom prevozu putnika na području Novog Sada“. Podaci o intenzitetu ulazaka putnika prikupljeni su sopstvenim istraživanjima, merenjem u realnim uslovima funkcionisanja sistema JGPP-a.

Praktična primena razvijenog postupka optimizacije izvršena je na dve linije JGPP-a u Novom Sadu, na liniji broj 3 i na liniji broj 5. Statički i dinamički elementi navedenih linija su u skladu sa ograničenjima razvijenog postupka optimizacije, odnosno obe linije su dijametralnog karaktera, sa intervalima sleđenja manjim od 15 minuta. Prosečan intenzitet ulaska putnika u vozila JGPP-a u Novom Sadu iznosio je 14,3 putnika/minuti.

Za kvantifikovanje ravnomernosti intervala sleđenja u ovom radu korišćen je parametar PRDM (Procenat pravilnosti devijacije intervala sleđenja). Rezultati istraživanja su pokazali da je ravnomernost intervala sleđenja na predmetnim linijama najlošija u poslepodnevnom periodu od 12:00 do 16:00 časova, pri čemu vrednosti PRDM-a prelaze 0,5 za većinu stajališta u drugom delu linije, odnosno prosečan poremećaj intervala sleđenja prelazi 50% od projektovanog intervala sleđenja vozila. Zbog nepostojanja konkretnih operativnih mera i strategija za upravljanje ravnomernošću intervala sleđenja vozila na analiziranim linijama, nastali poremećaji na jednom polasku prenosili su se na naredne polaske koji slede po redu vožnje. Poremećaji koji su nastali u prvoj četvrtini linije, a PRDM im je veći od 0,5, značajno su uticali na ravnomernost sleđenja vozila na više od 4 naredna polaska.

Praktičnom primenom razvijenog postupka optimizacije ravnomernosti intervala sleđenja, predmetne dijametralne linije podeljene su na po dve radijalne. Dijametralna linija

broj 3 Petrovaradin–Detelinara podeljena je na radijalne linije Petrovaradin–Centar i Centar–Detelinara. Dijametralna linija broj 5 Temerinski put–Avijatičarsko naselje podeljena je na radijalne linije Temerinski put–Centar i Centar–Avijatičarsko naselje. Na osnovu statičkih i dinamičkih elemenata novoformiranih linija, postojećih prevoznih zahteva i intenziteta ulazaka putnika u vozilo, dobijeni su sledeći rezultati optimizacije:

1. Ravnomernost intervala sleđenja

- Na obe linije u svim periodima postignuto je povećanje stepena ravnomernosti intervala sleđenja vozila,
- Veličina intervala sleđenja i veličina prevoznih zahteva uticala je na efekte optimizacije (najveća poboljšanja ravnomernosti su postignuta u vršnim periodima kada su intervali sleđenja najmanji, a broj ulazaka putnika po stajalištima najveći).

2. Vreme boravka putnika u sistemu

- Kraće vreme čekanja putnika na stajalištu je postignuto na obe linije za sve kombinacije, pri čemu su efekti optimizacije veći u vršnom periodu i povećavaju se sa rastom primarnog poremećaja na dijametralnoj liniji,
- Jedini negativan efekat na vreme boravka putnika u sistemu je vreme presedanja, pri čemu srednje vreme presedanja putnika zavisi isključivo od intervala sleđenja druge radijalne linije i poremećaja intervala u polasku druge radijalne linije,
- Uticaj podele dijametralnih linija na prosečno vreme boravka putnika u sistemu razlikuje se po linijama i periodima istraživanja,
- U vršnom periodu prosečno vreme boravka putnika u sistemu za obe linije se skraćuje za slučaj postojanja primarnih poremećaja većih od 2 minuta,
- U vanvršnim periodima, vreme boravka putnika se značajno produžava na liniji broj 5.

Na osnovu rezultata dobijenih u postupku optimizacije za predmetne linije može se zaključiti da:

- za slučaj iste veličine primarnih poremećaja, podelom dijametralne linije broj 3 značajno se povećava ravnomernost intervala sleđenja vozila, a vreme boravka putnika u sistemu se neznatno povećava u vanvršnim periodima,
- U analiziranim uslovima, za slučaj iste veličine primarnih poremećaja, podelom linije broj 3 bi se povećao kvalitet usluge,
- Za slučaj iste veličine primarnih poremećaja, podelom dijametralne linije broj 5 postiže se značajno povećanje ravnomernosti intervala sleđenja, ali zbog specifičnih tokova putnika značajno se produžava prosečno vreme boravka putnika u sistemu,
- U analiziranim uslovima, za slučaj iste veličine primarnih poremećaja, podelom linije broj 5 kvalitet usluge sa aspekta vremena putovanja putnika bi bio narušen.



Formiranjem i praktičnom primenom postupka optimizacije može se zaključiti da je dokazana druga osnovna hipoteza rada, odnosno da je korišćenjem determinističkog modela u fazi projektovanja linije moguće izvršiti optimizaciju statičkih elemenata linije, sa ciljem povećanja otpornosti sistema na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila na liniji JGPP-a.

## 8.1 PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

U skladu sa značajem uticaja ravnomernosti intervala sleđenja vozila na kvalitet usluge sistema JGPP-a, a na osnovu razvijenog modela i postupka optimizacije, određeni su mogući pravci daljih istraživanja.

U postupku razvoja determinističkog modela pažnja je bila usmerena na identifikovanje procesa koji utiču na širenje poremećaja i utvrđivanje veza i zakonitosti između parametara koji opisuju identifikovane procese, pri čemu nije uzeta u obzir stohastička priroda pojedinih parametara. Sistemi JGPP-a koji funkcionišu u mešovitom toku (row B i C) su izloženi velikom broju primarnih poremećaja, koji izvorno potiču od interakcije vozila JP sa ostalim vidovima kretanja. Nastali primarni poremećaji imaju stohastičko obeležje. Pravce daljih istraživanja bi trebalo usmeriti ka stohastičkom pristupu širenju poremećaja intervala sleđenja vozila u uslovima postojanja većeg broja primarnih poremećaja.

Jedan od zaključaka analize uticaja parametara modela na izlazne rezultate ističe da je širenje poremećaja intervala sleđenja u sistemu osetljivije na promenu parametra  $\beta$ , nego na broj stajališta na liniji. Parametrom  $\beta$  može se upravljati preko intenziteta ulazaka putnika u vozilo, koji zavisi od: režima izmene putnika, sistema naplate, udela pojedinih vrsta karata u sistemu, konstrukcije vozila itd. Pravce daljeg rada treba usmeriti ka istraživanju uticaja pojedinih elemenata sistema koji određuju intenzitet ulazaka putnika u vozilo na širenje poremećaja intervala sleđenja vozila.

Uticaj veličina projektovanog intervala sleđenja na stanje sistema u uslovima niske ravnomernosti intervala nije analiziran u ovom radu. Linije sa malim intervalima sleđenja (2 do 3 minuta) su osetljivije na poremećaj intervala, jer apsolutna veličina poremećaja lako dostiže projektovani interval sleđenja, odnosno lakše dolazi do uparivanja vozila. Veličina intervala sleđenja vozila iako ne utiče na širenje poremećaja ima nespornan uticaj na otpornost sistema na poremećaj. Pravce daljeg rada bi trebalo usmeriti ka istraživanju uticaja veličine projektovanog intervala sleđenja na funkcionisanje sistema u uslovima niske ravnomernosti intervala.

Razvojem tehnologija za pozicioniranje, sistema za bežični prenos podataka i računarskih tehnologija, AVL sistem je postao neizostavan informacioni sistem svakog savremenog JGPP-a. Dobijene informacije u realnom vremenu su omogućile razvoj i usavršavanje mnogih mera i strategija za povećanje ravnomernosti intervala na operativnom nivou. U opštoj ekspanziji usavršavanja pojedinačnih mera i strategija na operativnom nivou (zadržavanje vozila na stajalištima, preskakanje stajališta, ubacivanje dodatnog vozila i dr.)

malo pažnje se posvećuje kombinovanju različitih mera i strategija. Pravce daljih istraživanja bi trebalo usmeriti ka načinima kombinovanja različitih mera i strategija (na planskom i operativnom nivou) sa ciljem dobijanja optimalnih hibridnih rešenja, kao primenljivih postupaka u realnim uslovima za povećanje ravnomernosti intervala sleđenja vozila i ukupnog kvaliteta usluge.

## LITERATURA

- Abkowitz, Mark D., i Mark Lepofsky. 1990. „Implementing Headway-Based Reliability Control on Transit Routes“. *Journal of Transportation Engineering* 116 (1): 49–63. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:1(49).
- Abkowitz, Mark, Amir Eiger, i Israel Engelstein. 1986. „Optimal control of headway variation on transit routes“. *Journal of Advanced Transportation* 20 (1): 73–88. doi:10.1002/atr.5670200106.
- Andersson, Per-Åke, Åke Hermansson, Erik Tengvald, i Gian-Paolo Scalia-Tomba. 1979. „Analysis and simulation of an urban bus route“. *Transportation Research Part A: General* 13 (6): 439–66. doi:10.1016/0191-2607(79)90007-4.
- Banković, Radovan. 1994. *Organizacija i tehnologija javnog gradskog putničkog prevoza*. Beograd: Saobraćajni fakultet.
- Barker, J Barry, Danny Alvarez, Ronald L Barnes, Constance Garber, Fred M Gilliam, Sharon Greene, Robert H Irwin, David A Lee, Dmjm Harris, i Jeffrey M Rosenberg. 2004. *Transit Capacity and Quality of Service Manual*.
- Bartholdi, John J., i Donald D. Eisenstein. 2012. „A self-coordinating bus route to resist bus bunching“. *Transportation Research Part B: Methodological* 46 (4): 481–91. doi:10.1016/j.trb.2011.11.001.
- Bellei, Giuseppe, i Konstantinos Gkoumas. 2010. „Transit vehicles' headway distribution and service irregularity“. *Public Transport* 2 (4): 269–89. doi:10.1007/s12469-010-0024-7.
- Boyd, Colin W. 1983. „Notes on the theoretical dynamics of intermittent public passenger transportation systems“. *Transportation Research Part A: General* 17 (5): 347–54. doi:10.1016/0191-2607(83)90003-1.
- Carey, Malachy. 1994. „Reliability of interconnected scheduled services“. *European Journal of Operational Research* 79 (1): 51–72. doi:10.1016/0377-2217(94)90395-6.
- Carey, Malachy. 1998. „Optimizing scheduled times, allowing for behavioural response“. *Transportation Research Part B: Methodological* 32 (5): 329–42. doi:10.1016/S0191-2615(97)00039-8.
- Ceder, Avishai. 2007. *Public Transit Planning and Operation: Theory, modelling and practice*. Haifa: Technion-Israel Institute of Technology.
- Ceder, Avishai, Stephan Hassold, i Blanche Dano. 2013. „Approaching even-load and even-headway transit timetables using different bus sizes“. *Public Transport* 5 (3): 193–217. doi:10.1007/s12469-013-0062-z.
- Chandrasekar, P., Ruey Long Cheu, i Hoong Chor Chin. 2002. „Simulation Evaluation of Route-Based Control of Bus Operations“. *Journal of Transportation Engineering* 128 (6): 519–27. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:6(519).

- Chang, James, John Collura, François Dion, i Hesham Rakha. 2003. „Evaluation of Service Reliability Impacts of Traffic Signal Priority Strategies for Bus Transit“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1841 (1): 23–31. doi:10.3141/1841-03.
- Chapman, R. A., i J. F. Michel. 1978. „Modelling the Tendency of Buses to Form Pairs“. *Transportation Science* 12 (2): 165–75. doi:10.1287/trsc.12.2.165.
- Chen, Qin, Elodie Adida, i Jane Lin. 2013. „Implementation of an iterative headway-based bus holding strategy with real-time information“. *Public Transport* 4 (3): 165–86. doi:10.1007/s12469-012-0057-1.
- Chen, Weiya, Chunhua Yang, Fenling Feng, i Zhiya Chen. 2012. „An Improved Model for Headway-Based Bus Service Unreliability Prevention with Vehicle Load Capacity Constraint at Bus Stops“. *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2012: 1–13. doi:10.1155/2012/313518.
- Chen, Xumei, Lei Yu, Yushi Zhang, i Jifu Guo. 2009. „Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels“. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 43 (8). Elsevier Ltd: 722–34. doi:10.1016/j.tra.2009.07.006.
- Cortés, Cristián E., Doris Sáez, Freddy Milla, Alfredo Núñez, i Marcela Riquelme. 2010. „Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 18 (5). Elsevier Ltd: 757–69. doi:10.1016/j.trc.2009.05.016.
- Daganzo, Carlos F. 1997. *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Book. Illustrate. Tom 1. Pergamon.
- Daganzo, Carlos F. 2009. „A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons“. *Transportation Research Part B: Methodological* 43 (10). Elsevier Ltd: 913–21. doi:10.1016/j.trb.2009.04.002.
- Daganzo, Carlos F., i Josh Pilachowski. 2011. „Reducing bunching with bus-to-bus cooperation“. *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (1): 267–77. doi:10.1016/j.trb.2010.06.005.
- Delgado, F., Muñoz, J.C., Giesen, R. 2015. „Restructuring public transport through bus“. U *BRRT adding an R for reliability*. Oxford University Press. doi:10.1093/acprof:oso/9780199213832.003.0001.
- Delgado, Felipe, Juan Carlos Munoz, i Ricardo Giesen. 2012. „How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance?“ *Transportation Research Part B: Methodological* 46 (9): 1202–17. doi:10.1016/j.trb.2012.04.005.
- Delgado, Felipe, Juan Muñoz, Ricardo Giesen, i Aldo Cipriano. 2009. „Real-Time Control of Buses in a Transit Corridor Based on Vehicle Holding and Boarding Limits“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2090 (Decembar): 59–67. doi:10.3141/2090-07.
- Dessouky, Maged, Randolph Hall, Lei Zhang, i Ajay Singh. 2003. „Real-time control of buses for schedule coordination at a terminal“. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37 (2): 145–64. doi:10.1016/S0965-8564(02)00010-1.
- Diakaki, Christina, Vaya Dinopoulou, Kostas Aboudolas, Markos Papageorgiou, Elia Ben-

- Shabat, Eran Seider, i Amit Leibov. 2003. „Extensions and New Applications of the Traffic-Responsive Urban Control Strategy: Coordinated Signal Control for Urban Networks“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1856 (Januar): 202–11. doi:10.3141/1856-22.
- Ding, Yuqing, i Steven Chien. 2001. „Improving Transit Service Quality and Headway Regularity with Real-Time Control“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1760 (01): 161–70. doi:10.3141/1760-21.
- Eberlein, Xu Jun, Nigel H. M. Wilson, i David Bernstein. 1999. „Modeling Real-Time Control Strategies In Public Transit Operations“. U , 325–46. doi:10.1007/978-3-642-85970-0\_16.
- Eberlein, Xu Jun, Nigel H. M. Wilson, i David Bernstein. 2001. „The Holding Problem with Real-Time Information Available“. *Transportation Science* 35 (1): 1–18. doi:10.1287/trsc.35.1.1.10143.
- Eberlein, Xu Jun, Nigel H.M. Wilson, Cynthia Barnhart, i David Bernstein. 1998. „The real-time deadheading problem in transit operations control“. *Transportation Research Part B: Methodological* 32 (2): 77–100. doi:10.1016/S0191-2615(97)00013-1.
- Fu, Liping, Qing Liu, i Paul Calamai. 2003. „Real-Time Optimization Model for Dynamic Scheduling of Transit Operations“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1857 (Januar): 48–55. doi:10.3141/1857-06.
- Fu, Liping, i Xuhui Yang. 2002. „Design and Implementation of Bus-Holding Control Strategies with Real-Time Information“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1791 (02): 6–12. doi:10.3141/1791-02.
- Furth, Peter, i Theo H. Muller. 2000. „Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with Less Traffic Disruption“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1731 (Januar): 23–30. doi:10.3141/1731-04.
- Gladović, Pavle. 2012. *Sistem kvaliteta u drumskom transportu*. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka.
- He, Qing, K. Larry Head, i Jun Ding. 2014. „Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 46 (Septembar): 65–82. doi:10.1016/j.trc.2014.05.001.
- He, Sheng-Xue. 2015. „An anti-bunching strategy to improve bus schedule and headway reliability by making use of the available accurate information“. *Computers & Industrial Engineering* 85 (Juli): 17–32. doi:10.1016/j.cie.2015.03.004.
- Hernández, Daniel, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesen, i Felipe Delgado. 2015. „Analysis of real-time control strategies in a corridor with multiple bus services“. *Transportation Research Part B: Methodological* 78 (Avgust): 83–105. doi:10.1016/j.trb.2015.04.011.
- Hickman, Mark D. 2001. „An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem“. *Transportation Science* 35 (3): 215–37. doi:10.1287/trsc.35.3.215.10150.
- Hollander, Y. 2006. „The Cost of Bus Travel Time Variability“. The University of Leeds.
- Ibarra-Rojas, O.J., F. Delgado, R. Giesen, i J.C. Muñoz. 2015. „Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review“. *Transportation Research Part B: Methodological* 77 (Juli). Elsevier Ltd: 38–75. doi:10.1016/j.trb.2015.03.002.

- Ibarra-Rojas, Omar J., Fernando López-Irarragorri, i Yasmin A. Rios-Solis. 2015. „Multi-period Bus Timetabling“. *Transportation Science*, April. doi:10.1287/trsc.2014.0578.
- Jepson, D, i L Ferreira. 1999. „Assessing Travel Time Impacts of Measures to Enhance Bus Operations“. *Road and Transport Research Journal* 8 (4): 41–54.
- Jiamin Zhao, S. Bukkapatnam, i M.M. Dessouky. 2003. „Distributed architecture for real-time coordination of bus holding in transit networks“. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 4 (1): 43–51. doi:10.1109/TITS.2003.809769.
- Koffman, David. 1978. „A simulation study of alternative real-time bus headway control strategies“. *Transportation Research Record*, izd. 663: 41–46.
- Kraus, Werner, F A de Souza, R C Carlson, M Papageorgiou, L D Dantas, E Camponogara, E Kosmatopoulos, i K Aboudolas. 2010. „Cost Effective Real-Time Traffic Signal Control Using the TUC Strategy“. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 2 (4): 6–17. doi:10.1109/MITS.2010.939916.
- Lesley, L. 1975. „The role of the timetable in maintaining bus service reliability“. U *Operating Public Transport Symposium*. University of Newcastle upon Tyne.
- Levinson, Herbert. 2005. „The reliability of transit service: An historical perspective“. *Levinson, Herbert* 12 (1): 99–118. doi:10.1080/10630730500116735.
- Lin, Tyh-ming, i Nigel H M Wilson. 1992. „Dwell time relationships for light rail systems“. *Transportation Research Record*, izd. 1361: 287–95.
- Marguier, P. 1985. „Bus Route Performance Evaluation under Stochastic Conditions“. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- McLeod, Fraser, i Nick Hounsell. 2003. „Bus Priority at Traffic Signals—Evaluating Strategy Options“. *Journal of Public Transportation* 6 (3): 1–14. doi:10.5038/2375-0901.6.3.1.
- Muñoz, Juan Carlos, Cristián E. Cortés, Ricardo Giesen, Doris Sáez, Felipe Delgado, Francisco Valencia, i Aldo Cipriano. 2013. „Comparison of dynamic control strategies for transit operations“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 28 (Mart): 101–13. doi:10.1016/j.trc.2012.12.010.
- Nagatani, Takashi. 2001. „Bunching transition in a time-headway model of a bus route“. *Physical Review E* 63 (3): 036115. doi:10.1103/PhysRevE.63.036115.
- Nash, Andrew. 2003. „Implementing Zurich’s Transit Priority Program“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1835 (Januar): 59–65. doi:10.3141/1835-08.
- Newell, G. F. 1974. „Control of Pairing of Vehicles on a Public Transportation Route, Two Vehicles, One Control Point“. *Transportation Science* 8 (3): 248–64. doi:10.1287/trsc.8.3.248.
- Newell, G.F. 1977. „Unstable Brownian motion of a bus trip“. U *In Statistical Mechanics and Statistical Methods in Theory and Applications*. Landman.
- Newell, G.F., i R.B. Potts. 1964. „Maintaining a Bus Schedule“. U *2nd Australian Road Research Board*, 388–93. Melbourne.
- Osuna, E. E., i G. F. Newell. 1972. „Control Strategies for an Idealized Public Transportation

- System". *Transportation Science* 6 (1): 52–72. doi:10.1287/trsc.6.1.52.
- Pitka, Pavle, Milan Simeunovic, i Nenad Saulic. 2015. „Uniformity headway analysis of urban public transport“. *Suvremeni Promet - Modern Traffic* 35 (1-2): 136–40.
- Sabanovic, Asif, i Kouhei Ohnishi. 2011. *Motion Control Systems*. Journal of Public Transportation.
- Shalaby, Amer S. 1999. „Simulating Performance Impacts of Bus Lanes and Supporting Measures“. *Journal of Transportation Engineering* 125 (5): 390–97. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:5(390).
- Simeunovic, Milan. 2001. „Kvalitet prevozne usluge u javnom prevozu kao posledica međuzavisnosti statičkih i dinamičkih parametara“. Univerzitet u Novom Sadu.
- Simeunovic, Milan, Milja Lekovic, Zoran Papic, i Pavle Pitka. 2012. „Influence of vehicle headway irregularity in public transport on in-vehicle passenger comfort“. *Scientific Research and Essays* 7 (32). doi:10.5897/SRE12.091.
- Simeunović, Milja, Vuk Bogdanović, Pavle Pitka, i Milan Simeunović. 2016. „The influence of traffic conditions on the operation disorder of public transport vehicles“. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette* 23 (1). doi:10.17559/TV-20150406093507.
- Sun, Aichong, i Mark Hickman. 2005. „The Real-Time Stop-Skipping Problem“. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 9 (2): 91–109. doi:10.1080/15472450590934642.
- Sun, Aichong, i Mark Hickman. 2008. „The Holding Problem at Multiple Holding Stations“. U *Computer-aided Systems in Public Transport*, 339–59. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-73312-6\_17.
- Tirachini, Alejandro. 2013. „Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 30 (Maj). Elsevier Ltd: 239–56. doi:10.1016/j.trc.2011.11.007.
- Tirachini, Alejandro, i David A. Hensher. 2011. „Bus congestion, optimal infrastructure investment and the choice of a fare collection system in dedicated bus corridors“. *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (5). Elsevier Ltd: 828–44. doi:10.1016/j.trb.2011.02.006.
- Turnquist, Mark a., i Larry a. Bowman. 1980. „The effects of network structure on reliability of transit service“. *Transportation Research Part B: Methodological* 14 (1-2): 79–86. doi:10.1016/0191-2615(80)90034-X.
- van Nes, R. 2002. „Design of multimodal transport networks, a hierarchical approach“. Delft.
- van Oort, N., J. W. Boterman, i R. van Nes. 2012. „The impact of scheduling on service reliability: trip-time determination and holding points in long-headway services“. *Public Transport* 4 (1): 39–56. doi:10.1007/s12469-012-0054-4.
- van Oort, Niels. 2011. „Service Reliability and Urban Public Transport Design“. Technical University of Delft.
- van Oort, Niels. 2014. „Incorporating service reliability in public transport design and performance requirements: International survey results and recommendations“. *Research in Transportation Economics* 48. Elsevier Ltd: 92–100. doi:10.1016/j.retrec.2014.09.036.

- 
- Vuchic, Vukan. 1969. „Propagation of schedule disturbances in line-haul passenger transportation“. *U Rev UITP*, 281–85.
- Vuchic, Vukan. 2005. *Urban Transport Operation, Planning and Economics*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Vuchic, Vukan. 2007. *Urban Transit Systems and Technology*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Welding, P. I. 1957. „The Instability of a Close-Interval Service“. *Journal of the operational research society* 8 (3): 133. doi:10.2307/3007157.
- Xuan, Yiguang, Juan Argote, i Carlos F. Daganzo. 2011. „Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis“. *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (10). Elsevier Ltd: 1831–45. doi:10.1016/j.trb.2011.07.009.
- Yan, Yadan, Qiang Meng, Shuaian Wang, i Xiucheng Guo. 2012. „Robust optimization model of schedule design for a fixed bus route“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 25 (Decembar): 113–21. doi:10.1016/j.trc.2012.05.006.
- Yin, Yafeng, William H K Lam, i Mark a Miller. 2004. „A simulation-based reliability assessment approach for congested transit network“. *Journal of Advanced Transportation* 38 (1): 27–44. doi:10.1002/atr.5670380104.
- Zhao, Jiamin, Maged Dessouky, i Satish Bukkapatnam. 2006. „Optimal Slack Time for Schedule-Based Transit Operations“. *Transportation Science* 40 (4): 529–39. doi:10.1287/trsc.1060.0170.
- Zolfaghari, Saeed, Nader Azizi, i Mohamad Y. Jaber. 2004. „A model for holding strategy in public transit systems with real-time information“. *International Journal of Transport Management* 2 (2): 99–110. doi:10.1016/j.ijtm.2005.02.001.