

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Ivan D. Ivanović

**MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE
MREŽE ZA RAZLIČITE VREMENSKE
PRILIKE**

Doktorska disertacija

Beograd, 2017.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC
ENGINEERING

Ivan D. Ivanović

**MODELING OF STREET NETWORK
ASSINGMENT IN DIFFERENT WEATHER
CONDITIONS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017.

Mentor: Redovni profesor dr **Jadranka Jović**
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Članovi komisije: Redovni profesor dr **Jadranka Jović**
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

Redovni profesor dr **Dejan Filipović**
Univerzitet u Beogradu – Geografski fakultet

Docent dr **Vladimir Đorić**
Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet

**Datum
odbrane:**

Osećati zahvalnost, a ne iskazati je, isto je što i umotati poklon, a ne predati ga.

William Arthur Ward

U skladu sa navedenim, iskoristio bih ovu priliku da se zahvalim osobama koje su mi pružile veliku podršku tokom izrade doktorske disertacije.

Zahvaljujem se svom mentoru Prof. dr Jadranki Jović na podršci i sugestijama kojima me je strpljivo i pažljivo usmeravala kako kroz doktorsku disertaciju tako i kroz profesionalni razvoj. Posebno sam joj zahvalan na savetima koje je kao plod bogatog iskustva uvek bila spremna nesebično da podeli. Takođe, zahvaljujem se i Prof. dr Dejanu Filipoviću na kooperativnosti i otvorenosti za saradnju. Veliku zahvalnost dugujem docentu Vladimiru Đoriću i kolegici Dragani Petrović, koji su uvek bili raspoloženi da izdvoje svoje vreme i konstruktivnim diskusijama mi olakšaju donošenje odluka, kao i da mi udahnu novu energiju u trenucima pada entuzijazma. Zahvalio bih se i ostalim kolegama sa Katedre za planiranje i regulisanje saobraćaja na podršci. Osoba koja je umnogome učestvovala u formiranju moje inženjerske ličnosti i dala svoj doprinos ovoj disertaciji je Prof. dr Smiljan Vukanović. Nažalost, nećemo više biti u prilici da razgovaramo o životnim lepotama i temama koje su nas zajednički zanimale.

U pomoći pri formiranju baze meteoroloških podataka i podataka o saobraćaju zahvalio bih se Radomiru Jovanoviću i kolegama iz Sektora za upravljanje saobraćajem, Sekretarijata za saobraćaj.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici. Posebno bih se zahvalio mojoj Tanji i ćerki Sofiji kojima sam tokom izrade disertacije uskratio mnogo zajedničkih trenutaka. Roditeljima i braći Milanu i Dejanu hvala na beskrajnom poverenju, veri i spremnosti da deo mojih briga prihvate, prožive, i učine ih lakšim.

Zahvalan sam i svima koji su imali toliko strpljenja i razumevanja za sva moja odsustvovanja.

MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE MREŽE ZA RAZLIČITE VREMENSKE PRILIKE

Rezime:

Poznato je da nepovoljne vremenske prilike utiču na promene u efikasnosti funkcionisanja urbanih transportnih sistema. Kao rezultat uticaja najčešće dolazi do povećanja vremena putovanja i nivoa zagušenja ulične mreže. Usled visokog nivoa urbanizacije i porasta saobraćaja postalo je posebno značajno pažnju posvetiti svim potencijalno negativnim uticajima na performanse saobraćajnog sistema. To je u velikoj meri doprinelo intenzivnijem istraživanju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem.

Fokus doktorske disertacije je stavljen na kvantifikaciju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na elemente ponude transportnog sistema, i implementaciju dobijenih rezultata u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže. Ovo je posebno značajno jer većina postojećih modela i metoda koji se koriste u procedurama planiranja saobraćaja ne uključuju faktor uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, odnosno optimizirani su za idealne vremenske prilike.

Specifičnost analiziranog uticaja, u smislu prostorne i vremenske dinamičnosti je uslovlila potrebu da kroz disertaciju budu razvijeni posebni metodološki pristupi kvantifikacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet ulične mreže i brzinu kretanja vozila. Razvijenim metodologijama istraživanja je povećan nivo osetljivosti i preciznosti identifikovanih promena kao posledica uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Kao rezultat istraživanja generisani su koeficijenti osetljivosti elemenata transportne ponude na analizirani uticaj. Kategorije nepovoljnih vremenskih prilika u okviru kojih su analizirane promene u elementima ponude transportnog sistema definisane su u odnosu na klimatske karakteristike područja istraživanja.

Implementacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u modeliranje opterećenja ulične mreže je, pored istraživanja osetljivosti elemenata ponude transportnog sistema, podrazumevala i modifikaciju funkcije vremena putovanja u odnosu na analizirani uticaj. Funkcija vremena putovanja predstavlja jedan od najvažnijih

ulaznih parametara procedure modeliranja. Iako je kroz disertaciju metodologija modifikacije funkcije vremena putovanja razvijena na konkretnom tipu funkcije, karakteriše je opšta primenljivost. Testiranje i verifikacija metodologije implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže su realizovani na primeru Transportnog modela Beograda.

Implementacijom uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže omogućeno je kvalitetnije testiranje ponude saobraćajnog sistema u različitim scenarijima planiranog razvoja. Uvidom u efekte i posledice redukovanja performansi elemenata transportne ponude kroz modeliranje, pojednostavljuje se definisanje pravaca delovanja kako na strateškom tako i na operativnom nivou.

Ključne reči:

Nepovoljne vremenske prilike, Modeliranje opterećenja ulične mreže, Kapacitet ulične mreže, Funkcija vremena putovanja

Naučna oblast:

Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast:

Planiranje saobraćaja i saobraćajne infrastrukture

UDK broj:

MODELING OF STREET NETWORK ASSIGNMENT IN DIFFERENT WEATHER CONDITIONS

Abstract:

It is generally known that adverse weather conditions cause changes in functional efficiency of the urban transportation system, which results in larger travel times and higher congestion levels in street networks. Considering urbanization and traffic increase, it became particularly important to pay attention to any potentially negative impacts on the transportation system performance. It has largely contributed to a more intensive research of adverse weather impact on the urban transportation system.

The focus of this dissertation is quantification of adverse weather impact on the transport supply elements, and implementation of obtained results in the procedure of the street network assignment modeling. This is particularly important because most of the existing models and methods used in transportation planning does not include the factor of adverse weather impact, i.e. models and methods are optimized for ideal weather conditions.

The specificity of the analyzed impact, in terms of spatial and temporal dynamics, has caused the need to develop particular methodological approaches for quantifying the adverse weather impact on the street network capacity and vehicle speed. Level of sensitivity and precision of identified changes caused by adverse weather impact by developed methodologies, was improved. As a research result the sensitivity coefficients of transport supply elements on the analyzed impact, are generated. Categories of adverse weather conditions within which were analyzed changes in the transport supply elements are defined according to climate characteristics of research area.

Implementation of adverse weather impact in the street network assignment modeling is beside the research of transport supply sensitivity, also implied the modification of travel time function according to the analyzed impact. The travel time function represents one of the most important input parameters in street

network assignment modeling. Although, the methodology of travel time function modification was based on a specific function type, it is characterized by a general applicability. Implementation methodology of adverse weather impact in the street assignment modeling were tested and verified in the case of the Transport model of Belgrade.

The implementation of the adverse weather impact in the street network assignment modeling provides higher quality analysis of transport supply optimization, in different development scenarios. Knowing the possible effects and consequences of reducing transport supply performances through modeling, course of actions are simplified at strategic and operational level.

Keywords: Adverse Weather Conditions, Modeling Of Street Network Assignment, Street Network Capacity, Travel Time Function

Scientific Field: Traffic engineering

Field of Academic Expertise: Transport and Infrastructure Planning

UDC:

SADRŽAJ RADA

1. UVODNA RAZMATRANJA	1
1.1 FORMULACIJA PROBLEMA.....	1
1.2 PREDMET I CILJ DISERTACIJE	4
1.3 POSTAVLJENI CILJEVI I HIPOTEZE	7
1.4 OČEKIVANI DOPRINOS	9
2. ZNAČAJ I ULOGA TEME U ODNOSU NA UŽU NAUČNU OBLAST	11
2.1 KARAKTERISTIKE SAOBRAĆAJNIH PROBLEMA.....	11
2.2 VREMENSKE PRILIKE I SAOBRAĆAJNI SISTEM	14
2.3 MODELIRANJE U PLANIRANJU SAOBRAĆAJA.....	23
2.3.1. Relacija između modeliranja i donošenja odluka.....	27
2.3.2. Modeliranje raspodele opterećenja na uličnoj mreži	29
2.3.3. Funkcije vremena putovanja u modeliranju opterećenja ulične mreže.....	33
2.3.4. Ograničenja i kriterijumi u formiranju funkcije vremena putovanja.....	35
3. PREGLED LITERATURE	43
3.1 UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA NA NEPREKINUTE SAOBRAĆAJNE TOKOVE	43
3.2 UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA NA PREKINUTE SAOBRAĆAJNE TOKOVE	72
3.3 OCENA UTICAJA NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA NA MAKRO NIVOU.....	88
4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA UTICAJA NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA	96
4.1 METODOLOGIJA FORMIRANJA BAZE PODATAKA O VREMENSKIM PRILIKAMA	98
4.1.1. Klimatske karakteristike područja istraživanja.....	98
4.1.2. Kategorizacija padavina	108
4.2 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA OSETLJIVOSTI KAPACITETA ULIČNE MREŽE NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA.....	115
4.2.1. Teritorijalna i vremenska obuhvatnost istraživanja.....	122
4.2.2. Metoda prikupljanja podataka i merna oprema	125
4.2.3. Uzorak istraživanja	128
4.2.4. Način obrade prikupljenih podataka.....	128
4.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA OSETLJIVOSTI BRZINE KRETANJA VOZILA NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA.....	133

4.3.1.	Teritorijalna i vremenska obuhvatnost istraživanja.....	134
4.3.2.	Metoda istraživanja i merna oprema.....	139
4.3.3.	Uzorak istraživanja	142
4.3.4.	Način obrade prikupljenih podataka.....	143
5.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA	159
5.1	OSETLJIVOST KAPACITETA NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA.....	159
5.1.1.	Koeficijenti osetljivosti kapaciteta.....	163
5.2	OSETLJIVOSTI BRZINE KRETANJA VOZILA NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA	164
5.2.1.	Osetljivost brzine vozila koja u nizu prolaze deonicu	164
5.2.2.	Osetljivost brzine prvog vozila u redu.....	172
5.2.3.	Osetljivost brzine slobodnog toka	173
5.3	SINTEZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA	179
6.	MODIFIKACIJA FUNKCIJA VREMENA PUTOVANJA (FVP) U ODNOSU NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA.....	183
6.1	POSTAVKA PROBLEMA.....	183
6.2	DEFINISANJE OBLIKA FUNKCIJE VREMENA PUTOVANJA.....	188
7.	TESTIRANJE IMPLEMENTACIJE UTICAJA NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA U MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE MREŽE	199
7.1	IMPLEMENTACIJA FUNKCIJE VREMENA PUTOVANJA	200
7.2	ANALIZA REZULTATA TESTIRANJA	203
8.	ZAKLJUČAK.....	210
9.	LITERATURA.....	218
	PRILOG I Osnovne metode opterećenja ulične mreže	232
	PRILOG II Funkcije vremena putovanja.....	234
	PRILOG III Teorijski modeli utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.....	254
	PRILOG IV Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na poziciju vozila i primenjenu metodu proračuna.....	262
	PRILOG V Programski kod za generisanje koeficijenata BPR funkcije na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka (MatLabR2016a).....	263
	PRILOG VI Programski kod za modifikaciju BPR funkcije u odnosu na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika (MatLabR2016a).....	264

SPISAK TABELA

Tabela 1 Uticaj na saobraćajno okruženje i efikasnost saobraćajnog sistema	21
Tabela 2 Testiranje različitih FVP u modeliranju opterećenja ulične mreže	38
Tabela 3 Kapacitet na Nemačkim autoputevima u različitim uslovima okruženja.....	47
Tabela 4 Kategorizacija kiše po intenzitetu	48
Tabela 5 Upporedni prikaz redukcije kapaciteta kroz istraživanja.....	48
Tabela 6 Kategorizacija intenziteta kiše.....	49
Tabela 7 Zabeležena redukcija kapaciteta na pet analiziranih lokacija	49
Tabela 8 Procenat smanjenja kapaciteta usled različitih vremenskih prilika.....	51
Tabela 9 Uticaj vremenskih prilika na smanjenja kapaciteta HCM2000/studija	52
Tabela 10 Analizirani tipovi uticaja nepovoljnih vremenskih prilika	53
Tabela 11 Model redukcije kapaciteta u odnosu na intenzitet snega i vidljivost.....	55
Tabela 12 Kategorije kiše.....	57
Tabela 13 Procenat smanjenja brzine u odnosu na tip vremenskih prilika	58
Tabela 14 Procenat smanjenja prosečne brzine i brzine slobodnog toka.....	59
Tabela 15 Procenat smanjenja brzine pod uticajem kiše	63
Tabela 16 Redukcija brzine pod uticajem definisanih nepovoljnih vremenskih prilika.....	63
Tabela 17 Uticaj vremenskih prilika na smanjenja brzine HCM2000/studija.....	64
Tabela 18 Opseg promene brzine pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika.....	65
Tabela 19 Procenat smanjenja brzine pod uticajem kiše	66
Tabela 20 Modeli promene brzine u odnosu na uticaj kiše i saobraćajne uslove	67
Tabela 21 Redukovanje brzine slobodnog toka u odnosu na padavine i stepen vidljivosti	69
Tabela 22 Redukcija eksploatacione brzine i brzine slobodnog toka pod uticajem kiše	70
Tabela 23 Procenat smanjenja brzine slobodnog toka i zasićenog saobraćajnog toka.....	75
Tabela 24 Redukcija zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na analizirani prilaz.....	78
Tabela 25 Efekti prilagođavanja signalnih planova nepovoljnim vremenskim prilikama.....	79
Tabela 26 Kategorizacija kiše	80
Tabela 27 Kategorije analiziranih vremenskih prilika	83
Tabela 28 Promene u vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.....	84
Tabela 29 Upporedni rezultati istraživanja uticaja vremenskih prilika	90
Tabela 30 Prosečne temperature po mesecima	100
Tabela 31 Apsolutno maksimalne i minimalne izmerene temperature vazduha.....	100
Tabela 32 Prosečne temperature vazduha po godišnjim dobima	100
Tabela 33 Prosečna količina padavina po mesecima	101
Tabela 34 Prosečan broj dana sa padavinama na teritoriji grada Beograda	102
Tabela 35 Tehničke karakteristike AMS.....	104
Tabela 36 Broj snimljenih ciklusa u različitim vremenskim prilikama	128
Tabela 37 Ispitivanje pripadnosti populaciji.....	130
Tabela 38 Testiranje normalne raspodele intervala sleđenja za Lokaciju I (IVP)	131

Tabela 39 Primer setova izlaznih podataka iz GPS prijemnika.....	141
Tabela 40 Sadržaj seta izlaznih podataka GPRMC	141
Tabela 41 Rezultati analize vremena prolaska vozila deonicom.....	146
Tabela 42 Zabeleženi intervali sleđenja vozila u nizu na RAS2	147
Tabela 43 Karakteristike prolazaka "plutajućeg vozila" pod uticajem IVP	150
Tabela 44 Karakteristike prolaska prvog vozila u redu pod uticajem IVP	150
Tabela 45 Procentualno učešće ekstremnih vrednosti vremena prolaska	151
Tabela 46 Vremenska brzina kretanja vozila na RAS1 i RAS2 (uticaj IVP).....	153
Tabela 47 Dinamika promene brzine (V_0 pod uticajem IVP)	154
Tabela 48 Prosečna vrednost brzine slobodnog toka (uticaj IVP)	154
Tabela 49 Prosečna brzina kretanja vozila (uticaj IVP)	155
Tabela 50 Karakteristike brzina vozila zabeleženih radarom (uticaj IVP).....	157
Tabela 51 Testiranje normalnosti raspodele brzina zabeleženih radarom	158
Tabela 52 Redukcija zasićenog saobraćajnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika.....	161
Tabela 53 Koeficijenti osetljivosti kapaciteta	163
Tabela 54 Uporedna analiza prosečnih vremena prolazaka vozila u nizu	164
Tabela 55 Prosečne vrednosti intervala sleđenja vozila u nizu na RAS2	166
Tabela 56 Karakteristike prolazaka vozila pod uticajem KKI	169
Tabela 57 Karakteristike prolazaka vozila pod uticajem KKII.....	170
Tabela 58 Uporedna analiza karakteristika prolaska vozila opremljenog GPS uređajem ..	171
Tabela 59 Uporedna vremena prolazaka deonicom od strane prvog vozila.....	172
Tabela 60 Vremenska brzina kretanja vozila na RAS1 i RAS2 (uticaj KKI)	174
Tabela 61 Dinamika promene brzine (V_0 pod uticajem KKI)	175
Tabela 62 Prosečna vrednost brzine slobodnog toka (uticaj KKI)	175
Tabela 63 Prosečna brzina kretanja vozila (uticaj KKI).....	176
Tabela 64 Vremenska brzina kretanja vozila na RAS1 i RAS2 (uticaj KKII)	177
Tabela 65 Dinamika promene brzine (V_0 pod uticajem KKII).....	177
Tabela 66 Prosečna vrednost brzine slobodnog toka (uticaj KKII).....	177
Tabela 67 Prosečna brzina kretanja vozila (uticaj KKII)	178
Tabela 68 Karakteristike brzina vozila zabeleženih radarom (uticaj KKI i KKII)	178
Tabela 69 Koeficijenti osetljivosti kapaciteta	180
Tabela 70 Redukcija brzine pod uticajem analiziranih kategorija kiše.....	181
Tabela 71 Generisani koeficijenti BPR krivih	190
Tabela 72 Jednačine linearne regresije na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka...	191
Tabela 73 Kritične vrednosti stepena zasićenja raskrsnice (HCM 2000).....	193
Tabela 74 Generisani koeficijenti korigovanih BPR krivih	194
Tabela 75 Procentualna odstupanja između korigovanih i inicijalno definisanih krivih	195
Tabela 76 Inicijalno definisane i korigovane vrednosti koeficijenata α i β	196

Tabela 77 Razlike u RMSA i MAE između korigovanih i inicijalno definisanih krivih	196
Tabela 78 Upporedna analiza tri scenarija	203
Tabela 79 Opšti pokazatelji modeliranih scenarija	204
Tabela 80 Upporedna analiza izlaznih rezultata za posmatrane scenarije.....	206
Tabela 81 Uticaj KKI i KKII na emisiju aerogađenja	207
Tabela 82 Vrednosti parametra J_D za različite kategorije saobraćajnica	245
Tabela 83 Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za odgovarajuće širine prilaza.....	254
Tabela 84 Faktori uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka (Webster-ov model) ...	254
Tabela 85 Faktori uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka (HCM model)	256
Tabela 86 Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na trajanje zelenog signalnog pojma (HBS 2001).....	258
Tabela 87 Vrednosti korekcionih faktora (HBS 2001)	259
Tabela 88 Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na tip okruženja i namenu saobraćajne trake	260
Tabela 89 Faktori uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka	260

SPISAK SLIKA

Slika 1 Emisije ugljen-dioksida kao posledica transporta	16
Slika 2 Interakcija nepovoljnih vremenskih prilika i saobraćajnog sistema	20
Slika 3 Hijerarhijski nivoi modeliranja saobraćaja.....	26
Slika 4 Arhitektura sistema TREPS	87
Slika 5 Koraci ka ostvarenju postavljenih ciljeva	96
Slika 6 Klimatska zona istraživanog područja.....	98
Slika 7 Pozicija AMS u odnosu na analizirano područje	103
Slika 8 Kriterijumi za definisanje mikrolokacije AMS.....	103
Slika 9 Izlazni oblik podataka iz AMS.....	104
Slika 10 Proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (Metoda 1)	119
Slika 11 Proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (Metoda 2)	120
Slika 12 Lokacije analiziranih raskrsnica.....	124
Slika 13 Osnovno okruženje softvera za beleženje intervala sledenja.....	126
Slika 14 Prikaz rezultata testiranja normalne raspodele za Lokaciju I (IVP)	131
Slika 15 Lokacije pilot istraživanja	135
Slika 16 Raspodela saobraćajnih traka i broj vozila po petnaestominutnim intervalima ...	138
Slika 17 Merni uređaji na analiziranoj deonici.....	140
Slika 18 Izlazni podaci konvertovani uz pomoć sajta GPSvisualizer	142
Slika 19 Kriterijumi za utvrđivanje slobodne brzine	157
Slika 20 Testiranje normalnosti raspodele brzina zabeleženih radarom.....	158
Slika 21 Obuhvat područja ulične mreže za potrebe modeliranja	200
Slika 22 Kalibrisane funkcije vremena putovanja.....	202

Slika 23 Stepen iskorišćenja kapaciteta za analizirani deo ulične mreže (Scenario1)	205
Slika 24 FVP sa dve (a) i tri linearne prave (b)	236
Slika 25 Modifikovana FVP	238
Slika 26 Analizirani segment deonice i pozicija detektora	250

SPISAK GRAFIKONA

Grafik 1 Broj kišnih sati (a) i količina padavina (b)	107
Grafik 2 Intenziteti kiše na časovnom nivou	107
Grafik 3 Kategorizacija kiše	110
Grafik 4 Uporedna analiza podataka između AMS i RHMZ (2012)	113
Grafik 5 Uporedna analiza podataka između AMS i RHMZ (2013)	114
Grafik 6 Uporedna analiza podataka između AMS i RHMZ (2014)	114
Grafik 7 Procedura utvrđivanja merodavnog niza vozila	132
Grafik 8 Procentualna raspodela vozila po analiziranim petnaestominutnim intervalima ..	138
Grafik 9 Raspodela zabeleženih vremena prolaska deonicom	146
Grafik 10 Pozicija vozila u redu i vreme prolaska deonicom	147
Grafik 11 Raspodela intervala sleđenja vozila na RAS2	148
Grafik 12 Karakteristike kretanja "plutajućeg vozila" pod uticajem IVP	149
Grafik 13 Brzina slobodnog toka pod uticajem IVP	152
Grafik 14 Uporedna analiza V_{GPS} i V_t	156
Grafik 15 Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na nivou pozicije vozila u redu, procečna vrednost (a) i mediana (b)	159
Grafik 16 Rezultati Man Whitney U testa sličnosti intervala sleđenja susednih vozila	160
Grafik 17 Prosečne vrednosti vremena prolazaka vozila u nizu	165
Grafik 18 Korelacija između vremena prolaska i pozicije vozila u redu	166
Grafik 19 Prosečne vrednosti intervala sleđenja na RAS2	167
Grafik 20 Zavisnost između prosečnih intervala sleđenja i pozicije vozila u redu	167
Grafik 21 Karakteristike brzine tokom prolaska vozila u nizu pod uticajem KKI (GPS)	168
Grafik 22 Karakteristike brzine tokom prolaska vozila u nizu pod uticajem KKII (GPS)	170
Grafik 23 Raspodela učestalosti vremena prolaska prvog vozila (uticaj KKI i KKII)	172
Grafik 24 Prosečna vremena prolazaka prvog vozila u redu	173
Grafik 25 Brzina slobodnog toka pod uticajem KKI	174
Grafik 26 Brzina slobodnog toka pod uticajem KKII	176
Grafik 27 Aproksimirane BPR krive na osnovu ekperimentalno utvrđenih podataka	190
Grafik 28 Prave linearne regresije na osnovu ekperimentalno utvrđenih podataka	192
Grafik 29 Korigovane i inicijalno definisane BPR krive	195

SPISAK SKRAĆENICA

AMS	<i>Automatska meteorološka stanica</i>
ANOVA	<i>Analitički model za testiranje značajnosti razlika (Analysis Of Variance)</i>
BPR	<i>Tip funkcije vremena putovanja izdat od strane federalne uprave za autoputeve SAD (Bureau of Public roads)</i>
EUP	<i>Eksperimentalno utvrđeni podaci</i>
FVP	<i>Funkcija vremena putovanja</i>
GPS	<i>Sistem za globalno pozicioniranje (Global Positioning System)</i>
IPCC	<i>Međunarodna institucija čiji je rad baziran na naučnim mišljenima u promeni klime (Intergovernmental panel on climate change)</i>
ITS	<i>Inteligentni transportni sistemi (Intelligent Transport Systems)</i>
IVP	<i>Idealne vremenske prilike</i>
KKI	<i>Kategorija kiše I</i>
KKII	<i>Kategorija kiše II</i>
MAE	<i>Srednja apsolutna greška (Mean Absolute Error)</i>
PGDS	<i>Prosečan godišnji dnevni saobraćaj</i>
RAS1	<i>Raskrznica 1 (početna tačka analizirane deonice)</i>
RAS2	<i>Raskrznica 2 (krajnja tačka analizirane deonice)</i>
RHMZ	<i>Republički hidrometeorološki zavod</i>
RSI	<i>Koeficijent površine kolovoza (Road Surface Index)</i>
RMSA	<i>Koren iz srednje kvadratne greške (Root Mean Square Error)</i>
RWSI	<i>Sistem za informisanje o vremenskim prilikama na putu (Road Weather Information System)</i>
SSB	<i>Sneg sa bljuzgavicom</i>
TMB	<i>Transportni model Beograda</i>
VDS	<i>Sistem za detekciju vozila (Vehicle Detection System)</i>
VSL	<i>Promenljivo ograničenje brzine (Variable Speed Limit)</i>
WMO	<i>Svetska meteorološka organizacija (World Meteorological Organization)</i>
ZST	<i>Zasićen saobraćajni tok</i>

1. UVODNA RAZMATRANJA

1.1 FORMULACIJA PROBLEMA

Planiranje saobraćaja je inženjerska disciplina čiji je zadatak da prati i predviđa buduće trendove i optimizira pravce razvoja saobraćajnog sistema u cilju balansiranja transportne ponude sa transportnom potražnjom. Vremenom su se procedure planiranja saobraćaja usavršavale i postajale sveobuhvatnije analizirajući širi opseg pokazatelja koji bi mogao da utiče na ravnotežu između transportne ponude i potražnje. Pri uspostavljanju ove ravnoteže treba imati u vidu da dinamičnost transportne ponude i potražnje nije identična. Posmatrajući kapacitet ulične mreže, tokom vršnih i vanvršnih perioda, njegova promenljivost je manje izražena u odnosu na promene koje nastaju kada je reč o transportnim zahtevima. U tom kontekstu može se reći da i ulična mreža, bez saobraćajnog opterećenja kao i preopterećena ulična mreža predstavljaju, uslovno rečeno, “negativna” stanja.

Kao posledica debalansa pomenutih veličina, u kojem transportni zahtevi prevazilaze ponudu sistema, često dolazi do pojave zagušenja na uličnoj mreži. U toj situaciji, u skladu sa principima konvencionalnog planiranja, odgovor na povećane zahteve bi se tražio u obezbeđenju dodatnog kapaciteta, što se pokazalo samo kao kratkoročno rešenje. Novi kapacitet privlači i nove transportne zahteve na uličnoj mreži. Ove okolnosti su uslovile nastanak koncepta održivog planiranja saobraćaja koji je baziran na integralnoj analizi svih elemenata transportnog sistema kroz maksimalno iskorišćenje postojećih kapaciteta.

Pored povećanih transportnih zahteva, postoje i drugi uzroci koji mogu prouzrokovati zagušenja, radovi na saobraćajnici, saobraćajne nezgode ili neke druge incidentne situacije. Neki od navedenih uzroka mogu se svrstati u predvidive, dok se pojedini uzroci veoma teško mogu predvideti. Sa porastom urbanizacije i motorizovanog saobraćaja, obezbeđenje neophodnog kapaciteta počelo je da predstavlja svojevrsan izazov. Zato je važno uzeti u obzir sve uticaje koji potencijalno mogu da deluju na njegovo redukovanje.

Tema, koja je poslednjih decenija veoma aktuelna, su klimatske promene, odnosno analiza scenarija mogućih posledica klimatskih promena. Značajan doprinos aktuelizaciji ove teme dali su Šternov izveštaj iz 2007. godine (Stern, 2007) i izveštaj Međudržavnog panela o Klimatskim promenama (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007), koji su se bazirali na analizi uticaja klimatskih promena na širok spektar privrednih delatnosti. Mora se priznati da je tretiranje tematike vezane za klimatske promene doprinelo inteziviranju istraživanja uticaja vremenskih prilika u svim segmentima razvoja društva, pa tako i u saobraćaju. U zavisnosti od geografske lokacije područja, uticaj klimatskih promena ispoljava se na različite načine: kroz promenu temperature, poplave, promenu karakteristika padavina i ostalo. Iako se korisnici transportnog sistema vremenom naviknu na klimatske karakteristike područja u kome žive, klimatske promene su, pod uticajem promene karakteristika vremenskih prilika, doprinele da se sa procesom prilagođavanja nastavi.

Rezultati prethodnih istraživanja su, kao osnovne segmente uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem, identifikovali uticaj na transportne zahteve, na bezbednost saobraćaja, na saobraćajnu infrastrukturu i na ponašanje vozača. I pored toga što se i bez specifičnih istraživanja može zaključiti da nepovoljne vremenske prilike imaju uticaj na funkcionisanje saobraćajnog sistema, stiče se utisak da, kada je reč u gradskim urbanim sredinama, nije napravljen značajan progres u otklanjanju ili redukovanju posledica ove vrste uticaja.

U zavisnosti od geografskog područja razlikuju se i kriterijumi za ocenu nepovoljnih vremenskih prilika. Na primer, upoređujući klimatske karakteristike Španije i Norveške, pretpostavka je da su u pitanju različiti kriterijumi kada je reč o tome šta se podrazumeva pod nepovoljnim vremenskim prilikama. Uzrok tome je što se stanovnici vremenom naviknu na klimatske karakteristike područja u kom žive. Međutim, posmatrajući iz aspekta saobraćaja, idealne vremenske prilike se mogu opisati kao vremenske prilike bez padavina, sa suvim kolovozom, sa vidljivošću većom od 0.4 km i vetrom slabijim od 16 km/h (Kyte, Khatib, Shannon, & Kitchener, 2001). Kao dodatni kriterijum u pojedinim istraživanjima navodi se i temperatura iznad 10 °C (Tsapakis, Cheng, & Bolbol, 2013). U odnosu na to, svako

odstupanje od idealnih vremenskih prilika, moglo bi se podvesti pod nepovoljne vremenske prilike. U zavisnosti od klimatskih karakteristika područja, učestalost pojave određenog tipa nepovoljnih vremenskih prilika, doprinosi značaju analize njihovog uticaja na saobraćajni sistem.

Uprkos velikom broju istraživanja koja su se bavila uticajem nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem, veza između vremenskih prilika i parametara saobraćajnog toka u postojećim saobraćajnim modelima i alatima za analizu i dalje je slaba. Razlozi za to su, najčešće, ograničene ili neadekvatne baze podataka, kako o saobraćajnim pokazateljima tako i o karakteristikama vremenskih prilika u kojima se saobraćaj realizuje, a koje bi mogli da se koriste u istraživačke svrhe. Kao preduslov za uspostavljanje veze, potrebno je imati na raspolaganju kvalitetnu bazu podataka o saobraćajnim pokazateljima, dok je istovremeno potrebno raspolagati i podacima koji do detalja opisuju karakteristike vremenskih prilika u kojima se saobraćaj realizuje. Ne treba zaboraviti ni činjenicu da je saobraćajni sistem dinamičan, a da vremenske prilike karakteriše promenljiva prostorna i vremenska komponenta, što na dodatni način utiče na kompleksnost uspostavljanja korelacije između analiziranih veličina.

Pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika dolazi do promena u performansama saobraćajnog sistema. U vezi sa uspostavljanjem ravnoteže u saobraćajnom sistemu, uzroci promena mogu se objasniti analizom tri moguća scenarija:

- nepovoljne vremenske prilike utiču na promene u transportnim zahtevima,
- nepovoljne vremenske prilike utiču na promene u transportnoj ponudi sistema,
- nepovoljne vremenske prilike utiču i na promene u transportnim zahtevima i na promene u transportnoj ponudi.

U okviru prvog scenarija, potrebno je ispitati u kolikoj meri nepovoljne vremenske prilike utiču na promene u osnovnim karakteristikama kretanja, ukupnom broju kretanja, mobilnosti, prostornoj raspodeli, vidovnoj raspodeli, raspodeli po svrhama i vremenskoj raspodeli. Imajući u vidu da su kod velikog broja dnevnih

kretanja, izvor, cilj i svrha kretanja manje podložni promeni, posebnu pažnju treba obratiti na promene u vidovnoj i vremenskoj raspodeli kretanja koje nastaju kao posledica uticaja nepovoljnih vremenskih prilika.

Sa druge strane, može se krenuti i od pretpostavke da nikakvih promena u karakteristikama kretanja nema, već nepovoljne vremenske prilike utiču isključivo na promene u transportnoj ponudi. U tom slučaju, pažnju treba posvetiti analizi promena u vrednostima parametara saobraćajnog toka pod uticajem vremenskih prilika.

Da bi se došlo do sveobuhvatnih rezultata ocene uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem, potrebno je realizovati sistematična istraživanja i na strani transportnih zahteva i na strani transportne ponude.

U urbanim sredinama, nepovoljne vremenske prilike, naročito padavine, doprinose promeni okruženja u kojem se realizuju kretanja. Promena okruženja za posledicu ima promene u ponašanju učesnika u saobraćaju i karakteristikama pojedinih elemenata saobraćajne infrastrukture. Interakcija između učesnika u saobraćaju i saobraćajne infrastrukture se takođe menja. Na primer, u slučaju kiše, korisnik putničkog automobila menja način vožnje podstaknut slabijom vidljivošću usled kiše i iskustvenim znanjem da je koeficijent prijanjanja u odnosu na suv kolovoz promenjen. Korisnik na taj način svoje ponašanje prilagođava novonastalim uslovima, i individualnom reakcijom doprinosi promeni efikasnosti celokupnog saobraćajnog sistema. Promena efikasnosti se najčešće reflektuje kroz promenu kvaliteta opsluge saobraćajnog sistema i povećanje stepena zagušenja ulične mreže.

1.2 PREDMET I CILJ DISERTACIJE

Predmet disertacije predstavlja istraživanje uticaja vremenskih prilika na ponudu transportnog sistema. Ponuda transportnog sistema se može posmatrati kroz aspekt infrastrukture (iskorišćenje kapaciteta i pokrivenost ulične mreže) i kroz kvalitet opsluge (širok opseg parametara kvaliteta). Iako je reč o različitim aspektima posmatranja, veoma je teško napraviti jasno razgraničenje, jer postoji

jaka povezanost između kvaliteta opsluge i saobraćajne infrastrukture. Na primer, veoma često se termin ponuda saobraćajnog sistema poistovećuje sa podsistemom javnog gradskog prevoza putnika iako on predstavlja samo jedan element ponude. Podsistem javnog gradskog prevoza putnika po prirodi je determinisan (definisane su trase, redovi vožnje, tipovi vozila itd.). Ukoliko se izuzmu promene u transportnim zahtevima, najveći broj odstupanja od planirane realizacije je prouzrokovan promenama u karakteristikama saobraćajnog toka, u čemu značajan udeo ima saobraćajna infrastruktura.

Fokus u ispitivanju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na ponudu saobraćajnog sistema je stavljen na infrastrukturni aspekt, odnosno na kapacitet ulične mreže i varijabilnosti u karakteristikama saobraćajnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika. Dosadašnja iskustva su pokazala da se za identične nepovoljne vremenske prilike mogu dobiti drugačiji rezultati uticaja na saobraćajni sistem u različitim geografskim područjima (Agarwal, Maze, & Souleyrette, 2005). Iz tog razloga, ideja u disertaciji je da se na lokalnom nivou ispita uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na elemente saobraćajnog sistema. Na osnovu klimatskih karakteristika analiziranog područja, definisani su tipovi vremenskih prilika za koje je utvrđen najveći značaj u uticaju na saobraćajni sistem.

Kapacitet ulične mreže može se posmatrati kroz dva segmenta: kapacitet deonice i kapacitet raskrsnice. Deonice u saobraćajnom sistemu predstavljaju elemente sa fiksnim tehničkim karakteristikama i uslovno rečeno "fiksni" kapacitetom. Raskrsnice predstavljaju tačke u kojima dolazi do promene kapaciteta kao posledice preraspodele saobraćajnih tokova. I kapacitetom deonice i kapacitetom raskrsnice je moguće upravljati, ali je opseg mogućnosti i značajnost efekata na strani upravljanja raskrsnicom. Važno je istaći da kapacitet ne predstavlja pokazatelj efikasnosti saobraćajnog sistema, već stepen njegove iskorišćenosti.

Kapacitet ulične mreže ima veoma važnu ulogu kada je reč o jednom od najznačajnijih pokazatelja kvaliteta ponude transportnog sistema, a to je vreme putovanja. Vreme putovanja predstavlja parametar koji je podjednako važan kako

korisniku transportnog sistema tako i upravljaču transportnog sistema. Korisniku je bitno da putovanje obavi za što kraće vreme. Sa druge strane, kraće zadržavanje korisnika motorizovanog transportnog sredstva na uličnoj mreži, doprinosi uštedama i povećanju efikasnosti transportnog sistema koji se ogledaju kroz redukovanje emisija štetnih gasova, smanjenje nivoa buke, manju potrošnja goriva, povećanje mobilnosti i ostalo.

Između kapaciteta ulične mreže i vremena putovanja postoji korelacija. U slučaju visokog iskorišćenja kapaciteta, za očekivati je da vreme putovanja na uličnoj mreži raste. Visoko iskorišćenje kapaciteta može biti posledica povećanih transportnih zahteva, ili smanjenja kapaciteta pod uticajem različitih faktora. U svakom slučaju, potrebno je težiti ka minimizaciji vremena putovanja.

Dinamičnost saobraćajnog sistema značajno otežava pravovremeno reagovanje na promene koje u sistemu nastaju. Zato je neophodno postojanje modela koji omogućavaju testiranje i simulaciju različitih scenarija promena u saobraćajnom sistemu. Kao što je objašnjeno u prethodnom tekstu, promene koje će u ovom slučaju biti analizirane, nastaju kao posledica nepovoljnih vremenskih prilika. Većina modela opterećenja ulične mreže, koji se koriste u planiranju saobraćaja, ne sadrže parametre koji ukazuju na uticaj vremenskih prilika, odnosno primenjuju se za idealne vremenske prilike. Na taj način je onemogućeno modeliranje i ispitivanje osetljivosti saobraćajnog sistema na promene u punudi koje prouzrokuju nepovoljne vremenske prilike.

U modeliranju opterećenja ulične mreže jedan od osnovnih ulaznih parametara predstavljaju funkcije koje opisuju promenu vremena putovanja u odnosu na stepen iskorišćenja kapaciteta. Ukoliko je procedura raspodele opterećenja na uličnoj mreži bazirana na vremenu putovanja, kao osnovnom faktoru otpora u odnosu na koji se vrši raspodela saobraćaja, ove funkcije predstavljaju jedan od najvažnijih ulaznih elemenata. U literaturi se mogu pronaći pod različitim nazivima: funkcija vremena putovanja (travel time function), funkcija zagušenja deonice (link congestion function), funkcija kapaciteta deonice (link capacity functions), funkcija "protok-vremenski gubitak" (volume-delay function), funkcija

troškova na deonici (link cost function) i druge. U okviru disertacije biće usvojen i korišćen termin funkcija vremena putovanja (FVP).

Cilj disertacije predstavlja utvrđivanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika i implementiranje faktora uticaja u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže za potrebe planiranja saobraćaja. Implementacija faktora uticaja ogledaće se u kalibraciji funkcije vremena putovanja, koja, kako je pomenuto, predstavlja jedan od najvažnijih ulaznih elemenata procedure modeliranja saobraćajnog opterećenja. Bez obzira na tip FVP, koja se primenjuje u proceduri saobraćajnog opterećenja, kapacitet i vreme putovanja čine neizostavne elemente, pa će se analiza uticaja vremenskih prilika i bazirati na ova dva elementa. Na taj način bi modeliranje opterećenja ulične mreže bilo unapređeno za mogućnost uključivanja osetljivosti ponude saobraćajnog sistema pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, čime bi se doprinelo i kvalitetnijoj optimizaciji kapaciteta ulične mreže.

Za područje istraživanja izabran je Beograd, glavni grad Republike Srbije. Po popisu stanovništva iz 2011. godine u Beogradu je registrovano oko 1.391.000 stanovnika. Osnovne karakteristike saobraćajnog sistema u Beogradu biće prikazane kroz prizmu Transportnog modela Beograda (TMB) koji je poslednji put ažuriran 2015. godine (Jović et al., 2015). Transportni model karakteriše razvijena ulična mreža sa preko 2.800 km osnovne ulične i putne mreže i blizu 600 signalisanih raskrsnica. Sistem javnog gradskog prevoza putnika u okviru ITS1 (gradske zone) sadrži 160 linija javnog prevoza. U jutarnjem vršnom satu, koji se izdvaja kao najjači, realizuje se preko 370.000 kretanja. Intenzivna saobraćajna opterećenja na najznačajnijim gradskim saobraćajnicama, tokom vršnih perioda, bila su preporuka za ispitivanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na elemente ponude transportnog sistema Beograda.

1.3 POSTAVLJENI CILJEVI I HIPOTEZE

Osnovni cilj disertacije predstavlja utvrđivanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na ponudu saobraćajnog sistema i implementacija faktora uticaja vremenskih prilika u procedure planiranja saobraćaja na uličnoj mreži.

Ispunjavanje navedenog cilja kao osnovnog, uslovljavalo je realizaciju nekoliko međuciljeva:

- *Sistematizacija rezultata istraživanja realizovanih iz ove oblasti.* Na ovaj način se na osnovu prethodnih iskustava, unapređuje kvalitet istraživanja i stvara osnova za dokazivanje postavljenih hipoteza.
- *Definisanje vremenskih prilika koje su značajne za modeliranje opterećenja ulične mreže na području istraživanja.* Na osnovu prikupljenih podataka o karakteristikama vremenskih prilika na području istraživanja, biće definisane kategorije vremenskih prilika koje su na osnovu postavljenih kriterijuma ocenjene kao značajne za analizu.
- *Definisanje metodologije istraživanja uticaja vremenskih prilika na ponudu transportnog sistema.* Metodologija je bazirana na:
 - definisanju teritorijalne i vremenske obuhvatnosti istraživanja
 - definisanju uzorka istraživanja
 - definisanju metode i merne opreme za istraživanje
 - definisanju načina obrade rezultata istraživanja
- *Kvantifikacija uticaja vremenskih prilika.* Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika će biti kvantifikovan kroz praćenje promena vrednosti analiziranih parametara ponude saobraćajnog sistema pod uticajem analiziranih kategorija vremenskih prilika.
- *Uspostavljanje metodologije implementacije utvrđenog uticaja u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže.* Metodologiju implementacije i pored specifičnosti koje sadrži područje istraživanja, mora da karakteriše opštost primene.

Na osnovu predstavljene problematike postavljene su osnovne hipoteze. Imajući u vidu da je reč o analizi uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na ponudu saobraćajnog sistema osnovna hipoteza glasi:

Vremenske prilike utiču na karakteristike opterećenja ulične mreže.

U cilju ostvarenja mogućnosti da se uticaj vremenskih prilika implementira u procedure planiranja i upravljanja saobraćajem u gradovima, neophodno je dokazati narednu hipotezu:

Moguće je kvantifikovati uticaj vremenskih prilika na opterećenje ulične mreže.

S obzirom da će istraživanjem biti obuhvaćene varijacije vremenskih prilika tokom perioda istraživanja, u tom smislu je formirana sledeća hipoteza:

Od intenziteta i vrste vremenskih prilika zavisi i intenzitet uticaja na opterećenje ulične mreže.

1.4 OČEKIVANI DOPRINOS

Očekivani doprinos disertacije može da se podeli na segment vezan za rezultate istraživanja i segment vezan za metodologiju istraživanja tretirane problematike.

Opšti doprinos koji se očekuje je ukazivanje na značaj tretiranja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u procedurama planiranja i upravljanja saobraćajnim sistemom.

Kada je reč o osnovnim naučnim doprinosima baziranim na rezultatima istraživanja, oni se ogledaju u:

- kvantifikaciji uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na ponudu saobraćajnog sistema
- utvrđivanju zavisnosti između analiziranih parametara saobraćajnog sistema i nepovoljnih vremenskih prilika karakterističnih za lokalne uslove, primenom posebno razvijenih metodologija.
- implementaciji faktora uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u procedure planiranja saobraćaja, u cilju unapređenja efikasnosti procedure modeliranja.

Pored navedenih osnovnih naučnih doprinosa, doprinosi nižeg hijerarhijskog nivoa podrazumevaju:

- razvoj metodologije istraživanja ovog tipa koja do sada nisu realizovana na lokalnom nivou i
- sistematizaciju predhodnih iskustava iz ove oblasti

Nakon analize dobijenih rezultata biće definisani i pravci daljih istraživanja.

2. ZNAČAJ I ULOGA TEME U ODNOSU NA UŽU NAUČNU OBLAST

Planiranje saobraćaja je sveobuhvatna i kompleksna inženjerska disciplina. S obzirom na to, u okviru ovog poglavlja biće predstavljen značaj tretirane problematike u procesu planiranja saobraćaja u urbanim sredinama.

2.1 KARAKTERISTIKE SAOBRAĆAJNIH PROBLEMA

Problemi u saobraćaju su postali svakodnevnica, bilo da je reč o razvijenim zemljama sveta ili zemljama koje su u razvoju. Ograničenost resursa naftnih derivata još uvek ne predstavlja problem, ali svakako predstavlja temu o kojoj treba razmišljati. Intezivan rast drumskog saobraćaja i transportnih potreba dovodi do svakodnevnih problema koji se reflektuju kroz zagušenja, vremenske gubitke, saobraćajne nezgode i negativni uticaj na životnu sredinu. Ovi problemi se ne mogu rešiti samo delovanjem na saobraćaj i saobraćajnu ifrastrukturu (Ortúzar & Willumsen, 2011). Ekonomski rast takođe može da dovede do generisanja transportnih zahteva na koje kapacitet postojeće infrastrukture ne može da odgovori. Dug vremenski period bez investicija i neplansko projektovanje saobraćajne infrastrukture koja nije u stanju da isprati razvoj naseljenog područja, rezultuje i slabom ponudom transportnog sistema koja je nemoćna da reaguje i na najmanju neplaniranu promenu u transportnoj potražnji. Ovi problemi verovatno neće nestati u bliskoj budućnosti. Imajući u vidu da su resursi ograničeni, neophodno je uložiti napore u unapređenje kvaliteta saobraćajnog sistema. To se može postići pažljivim donošenjem odluka koje će maksimizirati korist uz minimiziranje troškova i negativnih efekata (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Ravnoteža transportne ponude i potražnje

Jedan od osnovnih zadataka planiranja saobraćaja je procenjivanje i obezbeđenje kapaciteta koji može da odgovori na ispostavljene transportne zahteve. Specifičnost transportnih zahteva se ogleda u različitim svrhama kretanja, vidovima kretanja, vremenskim i prostornim karakteristikama. Iako se vremenom koncept planiranja saobraćaja menjao, ravnoteža između transportne ponude i

potražnje je ostala ciljna funkcija. Obezbeđivanje ravnoteže u svakom trenutku vremenskog perioda planiranja je optimalno (Jovanović, 1990; Jović, 1996). Kada je reč o postizanju optimalnog stanja održavanjem ravnoteže, jasno je da to podrazumeva praćenje i upravljanje i transportnim zahtevima i transportnom ponudom. Problem čini kompleksnim dinamičnost veličina koje je potrebno uravnotežiti.

Kapacitet saobraćajnog sistema se može posmatrati kao statička i kao dinamička veličina. Statičke karakteristike kapaciteta se uglavnom vezuju za tehničke karakteristike ulične mreže. Dinamičnost kapaciteta, u smislu prilagodljivosti kapaciteta uslovima u saobraćajnom sistemu, ostvaruje se različitim mehanizmima upravljanja saobraćajem. Zahvaljujući tehnološkom razvoju, implementaciji informacionih sistema i inteligentnih transportnih sistema, upravljanje saobraćajem je postalo efektivnije.

Odnos između transportne ponude i potražnje, može se okarakterisati kao recipročan, ali asimetričan. Dok se transportna potražnja ne može realizovati bez odgovarajućeg nivoa transportne ponude, transportna ponuda može da postoji i bez transportne potražnje (Rodrigue, Claude, & Brian, 2013). Transportna ponuda se ne može skladištiti i koristiti u periodima većih transportnih zahteva, već treba veoma dobro proceniti transportne zahteve i kreirati optimalnu ponudu sistema (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Sa jedne strane, postoji transportna infrastruktura sa svim pratećim elementima, kao transportna ponuda, dok sa druge strane postoje vozila na uličnoj mreži, kao rezultat transportnih zahteva. U određenom broju slučajeva, transportna potražnja se, uz prihvatljiva odstupanja, može okarakterisati kao stabilan i rekurentan proces što omogućava dobru aproksimaciju transportne ponude. Problem sa održavanjem zadovoljavajućeg nivoa transportne usluge nastaje u situacijama nepredvidive i nestabilne transportne potražnje prouzrokovane različitim faktorima uticaja. Imajući u vidu dinamičnost procesa realizacije transportnih zahteva ove pojave nisu retkost.

Procedure planiranja saobraćaja u samom začetku bile su isključivo bazirane na primeni mera delovanja usmerenih na transportnu ponudu. Obezbeđenje dovoljnog kapaciteta je bio prioritet bez obzira o kakvoj veličini i vrsti transportnih zahteva je reč. Ograničenja vezana za mogućnost proširenja kapaciteta, naročito kada je reč o urbanim sredinama, uslovlila su promenu osnovnog koncepta i primenu mera i strategija orjentisanih na upravljanje transportnim zahtevima. Nekadašnji koncept „prilagođavanja grada saobraćaju“ zamenjen je konceptom „prilagođavanja saobraćaja gradu“ (Simićević, 2013).

Poslednjih decenija, potrošnja prirodnih resursa, zagađenja vazduha i vode, kao i klimatske promene uticali su na to da se postavi pitanje održivosti transportnog sistema. Postoji veliki broj definicija održivog transportnog sistema. Jedna od njih koja na sasvim jasan način ukazuje na smisao koncepta održivosti transportnog sistema glasi:

“Održivi transportni sistem je onaj u kom su potrošnja goriva, emisija gasova iz vozila, bezbednost, zagušenja i socijalna i ekonomska dostupnost na takvom nivou da mogu biti održivi u neodređenoj budućnosti bez nanošenja velikih ili nepopravljivih šteta budućim generacijama širom sveta” (Richardson, 1999).

Održivost, implementirana u procedure planiranja postavila je takve kriterijume da se predložena rešenja ne posmatraju samo iz aspekta funkcionalnosti. Nije više dovoljno samo implementirati mere koje eliminišu ili redukuju problem, već je potrebno sveobuhvatno analizirati uticaje koje implementacija mera ostvaruje u ekološkom, ekonomskom i socijalnom smislu. Naravno, i dalje je ciljna funkcija planiranja saobraćaja ostala ista, održavanje ravnoteže između transportne ponude i potražnje, ali se broj ograničavajućih faktora koje treba uzeti u obzir povećao.

Promena vremenskih prilika uslovljena klimatskim promenama, takođe je jedan od faktora koji utiče na debalans između transportne ponude i potražnje. Sa jedne strane, nepovoljne vremenske prilike utiču na redukciju kapacitivnih performansi transportnog sistema, dok sa druge strane utiču i na varijacije u karakteristikama

transportnih zahteva. Kompletna slika o uticaju vremenskih prilika na saobraćajni sistem, podrazumevala bi kvantifikaciju uticaja vremenskih prilika i na jednoj i na drugoj strani.

Kako je navedeno u prethodnim poglavljima, disertacija je usmerena na istraživanje uticaja vremenskih prilika na ponudu transportnog sistema. Iako se na ovaj način ne dobija kompletna slika u smislu kvantifikacije uticaja na saobraćajni sistem, značajno je istražiti u kojoj meri se kapacitivne performanse sistema menjaju pod uticajem vremenskih prilika. Naročito je važno, ukoliko se pokaže da se mogućnosti ponude transportnog sistema menjaju pod uticajem vremenskih prilika, obratiti pažnju na upravljanje transportnim zahtevima.

2.2 VREMENSKE PRILIKE I SAOBRAĆAJNI SISTEM

Klimatske promene

Pod vremenskim prilikama, u okviru disertacije, podrazumevane su prostorno i vremenski promenljive veličine kao što su temperatura, padavine i vetar. Iz interpretirane definicije klime koja je objavljena od strane Međunarodnog panela za klimatske promene (IPCC) najbolje se može uočiti korelacija između vremenskih prilika i klime.

“Klima u užem smislu je obično definisana kao „prosečno stanje vremenskih prilika“, ili preciznije, kao statistički opis srednjih vrednosti i varijabilnosti vremenskih prilika, u opsegu od nekoliko meseci do nekoliko hiljada ili miliona godina. Standardni period je 30 godina, po definiciji Svetske Meteorološke Organizacije (World Meteorological Organization – WMO)” (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

Poslednje decenije, posebna pažnja se posvećuje problemu klimatskih promena, odnosno posledicama koje klimatske promene izazivaju. Kada je reč o analizi i tumačenju klimatskih promena, važno je napomenuti da se klima oduvek menjala. Do početka industrijske revolucije, klima se menjala kao rezultat promena prirodnih okolnosti. Iako termin klimatske promene treba posmatrati kao promene u klimi bez obzira da li je uzrok prirodna varijabilnost ili delovanje

ljudskog faktora (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007), danas se termin klimatske promene uglavnom koristi kada se govori o promenama koje su nastale kao rezultat čovekovih aktivnosti.

Prema Okvirnoj konferenciji UN o promeni klime, termin promena klime označava “promenu klime koja je direktno ili indirektno uslovljena ljudskim aktivnostima koje izazivaju promene u sastavu globalne atmosfere, i koja je superponirana na prirodna kolebanja klime, osmotrena tokom uporedivih vremenskih perioda” (United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC, 2006). Ljudske aktivnosti koje direktno ili indirektno utiču na klimu označavaju se kao antropogeni faktor koji snosi odgovornost za globalno otopljanje i promenu klime jer je uslovio uvećan doprinos efekata staklene bašte, narušavanjem energetske bilansa atmosfere (United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC, 2006).

Ekonomista Nikolas Štern je objavljivanjem izveštaja u kome je opisan uticaj klimatskih promena na ekonomiju dodatno zaintrigirao svetsku javnost u smislu obraćanja pažnje na ovaj fenomen (Stern, 2007). Navedeni izveštaj je jednim delom uticao i na nametanje klimatskih promena kao teme međunarodnih odnosa u 21. veku.

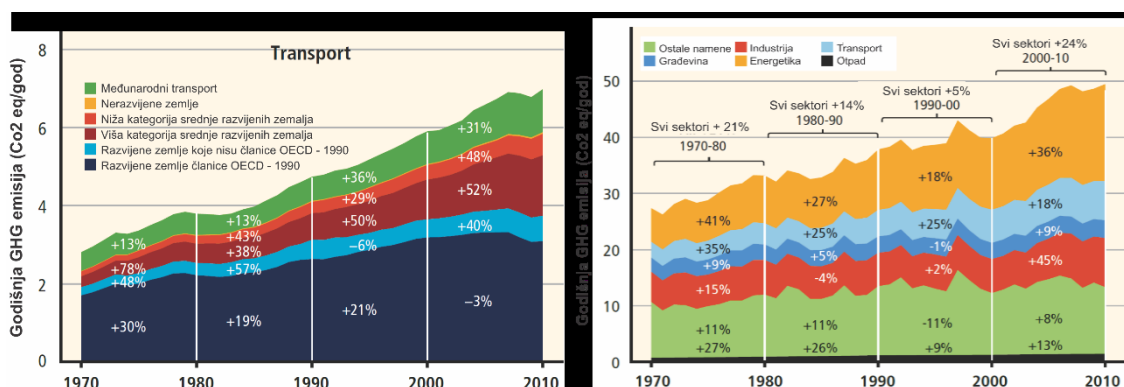
Jedna od osnovnih konstatacija Šternovog izveštaja je da koristi od intenzivnog, preventivnog delovanja na klimatske promene prevazilaze potencijalne troškove koje klimatske promene mogu izazvati. Sa druge strane, i u situaciji sveobuhvatnog delovanja na ublažavanje efekata klimatskih promena, rezultati delovanja bi bili vidljivi nakon dužeg vremenskog perioda. Pošto klimatske promene predstavljaju problem globalnih razmera, veoma je teško sprovesti preventivne mere na globalnom nivou.

U ovakvom scenariju, ključno za bavljenje uticajima klimatskih promena koji se ne mogu izbeći, predstavlja adaptacija, odnosno prilagođavanje istim. Strategije adaptacije bi morale da budu formirane na različitim hijerarhijskim nivoima, od međudržavnog, nacionalnog, pa preko regionalnog do lokalnog nivoa. Kada je reč o

transportnom sektoru navedene strategije bi podrazumevale izmenu postojećih procedura i standarda vezanih za planiranje, projektovanje i održavanje transportnog sistema. Ipak, nakon adaptacije kao prelazne faze, svu pažnju i energiju treba usmeriti na modele ublažavanja klimatskih promena, barem onog dela uticaja koji se odnosi na čovekovo delovanje.

Prema izveštaju iz 2007. godine emisije gasova staklene bašte na globalnom nivou koje su rezultat ljudskih aktivnosti, u porastu su od predindustrijskog perioda, uz povećanje od 79% u periodu između 1970. i 2004. godine (Stern, 2007).

I kroz izveštaje Međudržavnog panela o klimatskim promenama konstantno se radi na evaluacijama uticaja čovekovih aktivnosti na klimatske promene kroz različite vremenske preseke. U izveštaju iz 2014. godine predstavljen je doprinos transporta klimatskim promenama koji je izražen kroz emisiju CO₂. Na narednim dijagramima prikazani su podaci izveštaja IPCC iz 2014. godine (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) (Slika 1).



Slika 1 Emisije ugljen-dioksida kao posledica transporta (IPCC, 2014)

Na prvom dijagramu je prikazan odnos emisija CO₂ i kategorije vezane za stepen razvijenosti zemlje. Emisija CO₂ je prikazana na desetogodišnjim vremenskim intervalima. Sa grafika se vidi da su emisije CO₂ u konstantnom porastu kod svih kategorija analiziranih zemalja, s tim što je u poslednjoj analiziranoj dekadi zabeleženo neznatno ublažavanje emisije. U odnosu na analizirane sektore, emisija CO₂ od transporta, u svakoj od analiziranih dekada, ubraja se u tri najintezivnija izvora emisije, što je prikazano na drugom dijagramu. Mere koje se predlažu u cilju ublažavanja uticaja transporta na klimatske promene usmerene su na

promovisanje hibridnih i električnih vozila, korišćenje biogoriva, transfer sa drumskog na ostale vidove saobraćaja, podsticaj nemotorizovanih vidova saobraćaja, upravljanje namenom površina i drugih strategija i mera u skladu sa održivim razvojem.

Analiza pravca kretanja klimatskih promena zahteva složenu i sveobuhvatnu analizu koja neće biti sastavni deo disertacije. Iz navedenih izveštaja može se zaključiti da će i u području istraživanja doći do određenih klimatskih promena koje će se ispoljavati povećanjem i učestalošću obimnih padavina koje mogu dovesti do nestabilnosti u funkcionisanju vitalnih elemenata urbanih sredina u koje spade i saobraćajni sistem (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Klimatske promene su uticale da se karakteristike vremenskih prilika menjaju.

Ukoliko se postojeće karakteristike vremenskih prilika, u okviru područja istraživanja, mogu delom pripisati i uticaju klimatskih promena, onda bi moglo da se kaže da je tematika disertacija usmerena prvenstveno ka unapređenju kvaliteta procesa adaptacije klimatskim promenama.

Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem

Nepovoljne vremenske prilike u geografskom smislu predstavljaju veoma relativan pojam, odnosno, često se opisuju i definišu u odnosu na različite kriterijume. Na primer, u Glazgovu (Škotska), kao evropskom gradu sa značajnim brojem kišnih dana u toku godine i Sevilji (Španija), kao gradu sa značajnim brojem sunčanih dana i visokim temperaturama, definitivno postoje razlike u vremenskim prilikama koje se smatraju nepovoljnim. Činjenica je da se stanovnici određenog geografskog područja tokom vremena prilagode klimatskim karakteristikama područja, pa u odnosu na to formiraju kriterijume. Kada se saobraćajni sistem posmatra iz aspekta vozača, svaku promenu vremenskih prilika koja za posledicu ima promenu ponašanja vozača, treba uzeti u razmatranje.

Postoje različiti kriterijumi za definisanje nepovoljnih vremenskih prilika. Kyte (2001) je u svom radu predstavio kriterijume koji opisuju idealne vremenske

uslove u smislu delovanja na saobraćajni sistem. Idealni uslovi podrazumevaju (Kyte et al., 2001).

- suvo vreme, bez padavina,
- suv kolovoz,
- dobru vidljivost (veću od 0.4 km),
- intenzitet vetra slabiji od 16 km/h.

Kao dodatni kriterijum idealnih vremenskih prilika navedeno je i da temperatura treba da bude iznad 10⁰, čime se mogu upotpuniti prethodno navedeni kriterijumi (Tsapakis et al., 2013).

U skladu sa predstavljanim kriterijumima, svako odstupanje od idealnih vremenskih prilika moglo bi se svrstati pod nepovoljne vremenske prilike. Na osnovu prethodnih rezultata istraživanja uticaja na saobraćajni sistem, kao najuticajnije nepovoljne vremenske prilike mogu se izdvojiti padavine, ekstremne temperature i magla.

U odnosu na geografsku lokaciju područja, klimatske promene ne proizvode istovetne efekte. Na primer, u područjima koje karakterišu niske temperature, povećanje temperature može da deluje podsticajno na razvoj pojedinih grana poljoprivrede. Zbog toga se klimatske promene na lokalnom nivou ne mogu prihvatiti kao apsolutno negativna pojava. Situacija je slična i kada je reč o uticaju na saobraćajne sisteme.

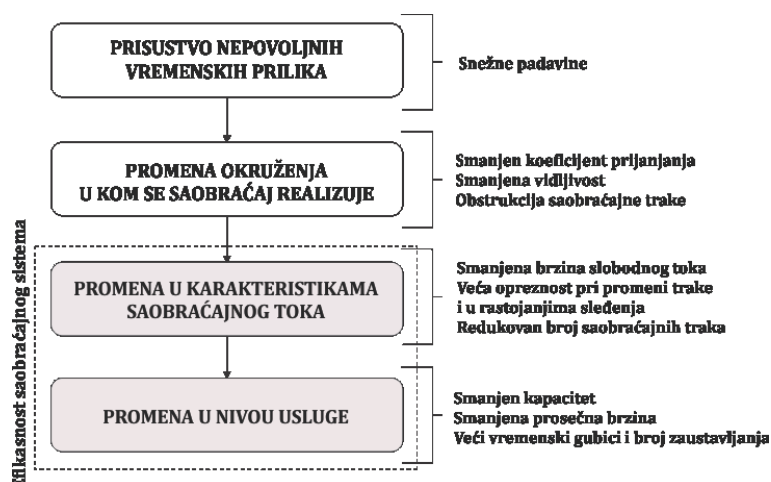
Koetse (2007) u svom radu navodi nekoliko različitih načina ispitivanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem (Koetse & Rietveld, 2007). Prvi podrazumeva upoređivanje saobraćajnih sistema u zemljama sa različitim karakteristikama vremenskih prilika. U ovom slučaju, razlike u osnovnim funkcionalnim pokazateljima mogu se delom pripisati različitim klimatskim karakteristikama. Međutim, postoji veliki broj ostalih faktora, kao što su socioekonomske karakteristike, kulturološke navike i slično, što može imati preovladavajući značaj po pitanju uočenih razlika. Drugi način je da se u okviru istog geografskog područja prate varijacije u vrednostima indikatora saobraćajnog

sistema i u ponašanju korisnika u odnosu na godišnja doba. Identifikovane promene, u ovom slučaju, bi sa većim nivoom sigurnosti mogle da se pripišu klimatskim karakteristikama. Treći način predstavlja direktno merenje interakcije između ponašanja korisnika i nepovoljnih vremenskih prilika. Na ovaj način je moguće identifikovati promene. Međutim, nepostojanje kontinuiteta u pojavi i intenzitetu nepovoljnih vremenskih prilika predstavlja otežavajuću okolnost.

U principu, veoma je jednostavno razumeti, pa i kvalitativno opisati, kakve efekte u saobraćaju proizvode nepovoljne vremenske prilike. Kvantifikacija tog uticaja nije jednostavna, a ona predstavlja prvi i najznačajniji korak u definisanju strategije i taktike eliminatornog ili preventivnog delovanja. Iste vrste nepovoljnih vremenskih prilika, na primer snega, neće proizvesti iste efekte na saobraćajni sistem u različitim delovima sveta. Sa druge strane, pretpostavka je i da snežna oluja na početku zime neće proizvesti iste efekte kao snežna oluja u drugoj polovini zimskog perioda kada su vozači već naviknuti na vožnju pod takvim uslovima. Kao odgovor na to nameće se zaključak da bi u cilju kvalitetne kvantifikacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika bilo neophodno sprovoditi istraživanja na lokalnom nivou, u skladu sa klimatskim specifičnostima područja istraživanja.

S obzirom da se promene u parametrima saobraćajnog toka reflektuju kao posledica promene ponašanja učesnika u saobraćaju nerealno je očekivati da postoji apsolutna konzistentnost u efektima uticaja. Različite reakcije korisnika na određene vremenske prilike takođe utiču na složenost implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u procedure planiranja i upravljanja saobraćajem i saobraćajne modele. U literaturi se mogu pronaći različiti rezultati kvantifikacije uticaja vremenskih prilika na pojedine parametre saobraćajnog toka.

Na narednom algoritmu predstavljen je primer interakcije između nepovoljnih vremenskih prilika i saobraćajnog sistema. U konkretnom slučaju su kao nepovoljne vremenske prilike podrazumevane snežne padavine (Slika 2).



Slika 2 Interakcija nepovoljnih vremenskih prilika i saobraćajnog sistema (Zhang, Holm, & Colyar, 2004)

Prikazana interakcija opisuje jedan od načina na koji pojava nepovoljnih vremenskih prilika utiče na umanjenje efikasnosti saobraćajnog sistema. Modeliranje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika bi za ulazne podatke podrazumevalo promene u karakteristikama saobraćajnog toka, dok bi izlaz iz modela bila promena u nivou usluge. Na osnovu dobijenih podataka o nivou usluge i ostalih pokazatelja vezanih za efikasnost saobraćajnog sistema, definisale bi se smernice delovanja. Ono što dodatno otežava situaciju kod analize uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem je njihova promenljivost. Ova činjenica u znatnoj meri utiče na kompleksnost modelovanja efekata delovanja na saobraćajni sistem.

Pisano (2004) je u svom radu dao nešto širi prikaz uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na promene u saobraćajnom okruženju i efikasnost saobraćajnog sistema (Pisano & Goodwin, 2004) (Tabela 1).

Tabela 1 Uticaj na saobraćajno okruženje i efikasnost saobraćajnog sistema (Pisano & Goodwin, 2004)

Tip nepovoljne vremenske prilike	Uticaj na saobraćajno okruženje	Efikasnost saobraćajnog sistema
Kiša, sneg, susnežica, grad i poplave	Smanjena vidljivost Smanjen koeficijent prijanjanja Obstrukcija saobraćajnih traka Smanjene performanse vozila Oštećenje infrastrukture	Smanjenje kapaciteta Smanjenje brzine i povećanje vremenskih gubitaka Povećanje varijabilnosti brzine Povećanje rizika od saobraćajne nezgode Privremeno zatvaranje saobraćajnica
Jak vetar	Smanjena vidljivost u kombinaciji sa padavinama Obstrukcija saobraćajnih traka (usled nanosa snega) Smanjene performanse vozila	Povećanje vremenskih gubitaka Smanjenje brzine Privremeno zatvaranje saobraćajnica
Magla, smog i dim	Smanjena vidljivost	Smanjenje brzine i povećanje vremenskih gubitaka Povećanje varijabilnosti brzine Povećanje rizika od saobraćajne nezgode Privremeno zatvaranje saobraćajnica
Grmljavina i ekstremne temperature	Oštećenje saobraćajne infrastrukture	Oštećenje elemenata upravljanja saobraćajem Gubitak električne energije

Očigledno je da vremenske prilike utiču na promenu okruženja u kome se realizuje vožnja. Ako bi se izdvojila četiri osnovna oblika uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na efikasnost saobraćajnog sistema to bi bilo: smanjenje kapaciteta ulične mreže, smanjenje brzine kretanja, povećanje vremenskih gubitaka i povećanje rizika od saobraćajne nezgode. Smanjena brzina kretanja i povećani vremenski gubici rezultuju povećanjem vremena putovanja. Sve navedeno doprinosi pojavi zagušenja na uličnoj mreži koje umanjuje efikasnost saobraćajnog sistema.

Različiti uticaji okruženja doprinose promenama u ponašanju učesnika u saobraćaju i karakteristikama elemenata saobraćajne infrastrukture, kao i u njihovoj međusobnoj interakciji. Učesnik u saobraćaju se prilagođava novonastalim uslovima. Promena ponašanja vozača, koja se reflektuje kroz promenu brzine kretanja, rastojanja sleđenja, izbor drugačije trase kretanja, što predstavlja posledice individualnih reakcija, direktno utiče na performanse celokupnog transportnog sistema (Hranac et al., 2006). U izveštaju koji su objavili Hranac i ostali (2006) prikazan je i kvalitetan pregled literature vezan za istraživanja ponašanja vozača pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika. Rezultati istraživanja su pokazali da nepovoljne vremenske prilike utiču na povećanu koncentraciju vozača u procesu donošenja odluka tokom vožnje, kao i da su vozači svesni rizika koji pojedine vremenske prilike izazivaju kada je u pitanju

bezbednost saobraćaja. Model ponašanja vozača varira u zavisnosti od klimatskih karakteristika područja u kom se realizuje vožnja (prosečan broj dana sa padavinama godišnje, intenziteti i vrsta padavina). Za identične nepovoljne vremenske prilike mogu se dobiti sasvim drugačije reakcije vozača u različitim prostornim područjima.

Iako nije predmet disertacije, neophodno je pomenuti da pored istraživanja uticaja vremenskih prilika na ponudu transportnog sistema postoji i veliki broj istraživanja baziranih na ispitivanju uticaja vremenskih prilika na transportnu potražnju (Cools, Moons, Creemers, & Wets, 2010; Khattak & De Palma, 1997; Maze, Agarwal, & Burchett, 2006; Petrović, Ivanović, & Djorić, 2015; Van Berkum, Weijermars, & Hagens, 2006). Navedeni radovi su uglavnom bazirani na izboru vida prevoza u zavisnosti od vremenskih prilika. Rezultati istraživanja su u većini slučajeva pokazali da postoji uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na izbor vida prevoza. Ovaj uticaj je posebno izražen u područjima sa visokim učešćem nemotorizovanih kretanja u ukupnoj raspodeli kretanja. Takođe je analiziran i uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vremensku raspodelu putovanja. Dobijeno je da nepovoljne vremenske prilike utiču na promene u planiranom vremenu realizacije pojedinih svrha kretanja, čak i na otkazivanje pojedinih kretanja. Ova pojava se u većini slučajeva javlja kod neobavezujućih svrha kretanja (rekreacija, trgovina, razonoda itd.) i ekstremnih nepovoljnih vremenskih prilika. U pogledu planirane trase putovanja, u vrlo malom broju slučajeva su zabeležena odstupanja od planirane trase kao posledice uticaja nepovoljnih vremenskih prilika.

U pojedinim istraživanjima utvrđeno je da se kao posledica promena karakteristika transportnih zahteva menja i vrednost protoka saobraćaja. Al Hassan i Barker (1999) rezultatima istraživanja pokazali su da je prosečno smanjenje protoka saobraćaja u Škotskoj oko 15%, u slučaju kada je kolovoz prekriven snegom, odnosno za 4.6% u danima sa kišom jakog intenziteta (Hassan & Barker, 1999). Nešto blaži rezultati zabeleženi su u Melburnu, gde su autori došli do rezultata koji pokazuju smanjenje protoka saobraćaja od 1.35% u vlažnim danima tokom zime, odnosno 2.11% u vlažnim danima tokom proleća (Keay & Simmonds, 2005). Iako

su istraživanja pokazala da je često manji obim saobraćaja u nepovoljnim vremenskim uslovima, kombinacija smanjene brzine i kapaciteta izaziva ozbiljna zagušenja, naročito na gradskoj uličnoj mreži sa signalisanim raskrscima (Perrin, Martin, & Hansen, 2001).

U cilju sveobuhvatne ocene uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem neophodno je analizirati i promene do kojih dolazi u transportnoj potražnji kao i u transportnoj ponudi. U oba slučaja je neophodno izvršiti kvantifikaciju uticaja, što predstavlja preduslov za primenu mera koje bi bile u stanju da taj uticaj redukuju. Ova disertacija je usmerena na kvantifikaciju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika prvenstveno na elemente ponude transportnog sistema.

2.3 MODELIRANJE U PLANIRANJU SAOBRAĆAJA

Promene na svim poljima životnih aktivnosti, koje su uočljive poslednjih decenija, dovele su do promena i kada je u pitanju saobraćaj. Intenzivan tehnološki razvoj uslovio je prilagođavanja promenama u što je moguće kraćem vremenskom periodu. Međutim, kada je u pitanju saobraćaj, problemi su uglavnom ostali isti i vezani su za zagušenja, zagađenje, bezbednost saobraćaja, nedostatak finansijskih sredstava itd. Vremenom se pokazalo da loše planiranje saobraćaja, ograničene investicije, naglasak na kratkoročnim rešavanjima problema i nepoverenje prema strateškom planiranju saobraćaja, ne daje dobre rezultate (Ortúzar & Willumsen, 2011). Često se dešava da se problemi, rešavani pod pritiskom i na prethodno opisan način, ne rešavaju, već se samo odlažu. Pored toga, velika je verovatnoća da se problemi ponovo pojave u novom obliku što prouzrokuje potrebu za kompleksnim i komplikovanim rešenjima.

Tehnološki napredak je obezbedio veće samopouzdanje u rešavanju problema primenom tehničkih rešenja (Ortúzar & Willumsen, 2011). Nova tehnološka rešenja pronašla su svoje mesto i primenu i u saobraćaju primenom savremenih softvera, informacionih tehnologija, GPS sistema, geografsko informacionih sistema, mobilne tehnologije i drugog. Na ovaj način kvalitet planiranja je praktično sveden na iskustvo, znanje i veštinu, odnosno na ljudski faktor.

Dinamičnost saobraćajnog sistema kao jedna od osnovnih karakteristika značajno otežava pravovremeno reagovanje na promene koje u sistemu nastaju. Upravo ta činjenica uslovljava neophodnost postojanja kvalitetnih baza podataka vezanih za analizu i razvoj saobraćajnog sistema. Uspostavljanjem međusobnih relacija između raspoloživih baza podataka formiraju se transportni modeli koji pojednostavljeno predstavljaju realni sistem sa fokusom na elemente koji su važni iz ugla posmatranja problema. Transportni modeli objedinjuju socio-ekonomske podatke, podatke o nameni površina, podatke o saobraćajnoj infrastrukturi, podatke o karakteristikama kretanja, podatke o ponašanju putnika kao i sve podatke koji mogu biti relevantni za izvođenje različitih saobraćajnih analiza (Jović, 2007).

Postoje različite vrste modela, ali će u okviru doktorske disertacije najviše pažnje biti posvećeno matematičkim modelima. Ovim modelima se pomoću matematičkih jednačina i teorijskog znanja o rešavanom problemu, pokušava opisati analizirani sistem na što realniji način. Iako je reč o pojednostavljenim predstavljajima, ovi modeli mogu biti veoma složeni i mogu podrazumevati veoma velike baze podataka. Modeli zauzimaju veoma značajno mesto i kada je reč o kreiranju politike i strategije razvoja sistema. Testiranjem različitih scenarija rešenja modeli omogućavaju bolje sagledavanje situacije i olakšavaju donošenje pravih odluka.

Modeliranje zahteva velika uopštavanja i pretpostavke, u suprotnom model može da postane beskoristan (Đorić, 2013). Dve formulacije modela koje daju potpuno suprotan stav glase:

1. Modeliranje zahteva shvatanje pojava u svojoj svojoj kompleksnosti.
2. Modeliranje je grubo ali inteligentno redukovanje.

Sa jedne strane, treba biti svestan kompleksnosti pojave, dok sa druge strane treba biti spreman na veliko, ali smisleno uopštavanje. Tako modeliranje predstavlja balans između kvantiteta i kvaliteta podataka kojima raspolažemo (Đorić, 2013; Kallenrode, 2006).

Modeli su pomoćno sredstvo za preciznije sagledavanje transportnih zahteva u uslovima simultane promene većeg broja ulaznih planerskih pretpostavki. Modeli ne daju gotova rešenja, već planerima omogućavaju da sagledaju okolnosti razvoja koje nije moguće sagledati bez modela, zbog složene međuzavisnosti pojedinih parametara (Jović, 1996).

Između modeliranja i prognoze postoji jasno prepoznatljiva razlika (Ortúzar & Willumsen, 2011). Modeliranje se fokusira na formiranje i primenu odgovarajućih alata koji su osetljivi na promene u sistemima koji se modeliraju. Uspešan modelar obezbediće koristan i pravovremen savet u procesu donošenja odluke. Vrlo je važno da model daje konzistentne rezultate na osnovu kojih je moguće rangirati odgovarajuće alternative, čak i ukoliko rezultati modela odstupaju u određenoj meri od realnih vrednosti (Ortúzar & Willumsen, 2011).

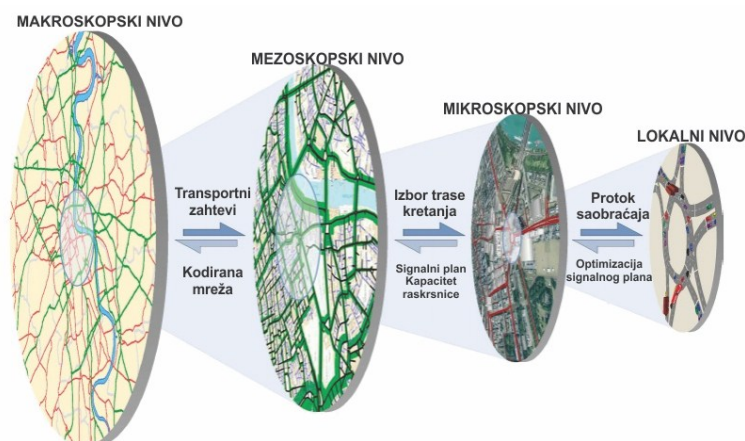
Prognoza predstavlja pokušaj predviđanja i kvantifikacije budućih uslova. Prognoze su uglavnom bazirane na formalnim modelima, ali na taj način se ne može dobiti potpuna slika, već je neophodno inkorporirati dodatne analize i pretpostavke. Imajući u vidu neizvesnosti, u prognoziranju se može koristiti više komplementarnih pristupa. Uspeh prognoze se jedino može objektivno oceniti merenjem posmatranih parametara, pre i nakon realizacije studije.

Modeliranje saobraćaja nije isto što i planiranje saobraćaja. Modeliranje predstavlja podršku i ima veoma važnu ulogu u procedurama planiranja. Planiranje, donošenje odluka i implementacija određenih mera imaju moć da promene stvari, dok modeliranje može pomoći da svaki od navedenih procesa donese što bolje efekte. Za ostvarenje takvog cilja neophodni su iskusni planeri ali i kvalitetni i stručni modelari. Veoma je značajno napomenuti i da tokom formiranja, kalibracije i upotrebe modela, planeri mogu dodatno naučiti o detaljima funkcionisanja sistema.

U zavisnosti od karakteristika problema i željenog nivoa detaljnosti analize, modeliranje opterećenja ulične mreže se može realizovati na različitim hijerarhijskim nivoima. Na svakom od tih nivoa moguće je ispitivati različite

scenarije rešenja, a razlike u nivou detaljnosti uslovljavaju i različite setove neophodnih ulaznih parametara. Sa tehnološkim napretkom, mogućnosti za formiranjem modela većih detaljnosti su rasle. Kvalitetni rezultati modeliranja omogućavaju bolje sagledavanje problema i olakšavaju procedure predlaganja adekvatnih mera rešenja. Kako se nivo detaljnosti modeliranja povećava, tako se i predlozi mera unapređenja transportnog sistema pomeraju, na skali od strateškog ka operativnom (Slika 3). Na osnovu nivoa detaljnosti, mogu se definisati sledeći nivoi modeliranja (Transport for London, 2010):

- Makroskopski,
- Mezoskopski,
- Mikroskopski,
- Lokalni.



Slika 3 Hijerarhijski nivoi modeliranja saobraćaja (Transport for London, 2010)

Vrlo je teško uspostaviti kategorične granice u nivoima modeliranja. Svaki od predstavljenih hijerarhijskih nivoa može da sadrži neke od karakteristika susednih nivoa. Na primer, u okviru disertacije, istraživanja vezana za uticaj vremenskih prilika na pojedine parametre saobraćajnog procesa će se sprovoditi na mikro nivou, da bi se evaluacija apsolutnog uticaja izvršila na mezoskopskom nivou modeliranja. U principu, kompleksnost razmatranog problema i potreban nivo detaljnosti analize opredeljuje hijerarhijski nivo na kome se modeliranje realizuje.

2.3.1. Relacija između modeliranja i donošenja odluka

S obzirom da je modeliranje predstavljeno kao alat koji u planerskom poslu olakšava proceduru donošenja odluka, pre definisanja procedure modeliranja potrebno je poznavati metodologiju donošenja odluka. Ortuzar i Willumsen su u knjizi "Modeliranje transporta" predstavili dva osnovna pristupa u donošenju odluka koje za osnovu imaju rezultate modeliranja: princip racionalnosti i indirektni pristup.

Kod principa racionalnosti podrazumeva se jasno poznavanje ciljeva i pretpostavljanje svih alternativnih načina na koji se oni mogu ostvariti, sa kvantifikacijom troškova i koristi, i ostalih podkriterijuma vezanih za svaku alternativu. Princip racionalnosti za suštinu ima kvantifikaciju. U pojedinim slučajevima moguće je da se problem odlučivanja smesti u okvire matematičkog programiranja, definisanjem funkcije cilja i kriterijuma koje ta funkcija treba da ispunjava. Međutim, ponekad je veoma teško kvantifikovati i konvertovati pojedine elemente u poželjan oblik. U ovom slučaju rezultati modeliranja predstavljaju osnovni oslonac u proceduri donošenja odluke. Tada treba posebno voditi računa o tome da li su uzroci dobijeni modelom i realni izvori problema, kao i o činjenici da korisnicima sistema često nije stalo do optimizacije sistema, već do najboljeg nivoa usluge koji im se plasira. Takođe, treba imati u vidu da formiranje kvalitetnih modela, uz složenost zadatka, najčešće karakteriše i visok nivo troškova.

Indirektni pristup donošenja odluka ili, kako ga je Lindblom nazvao nauka o snalaženju, (Braybrooke & Lindblom, 1963) govori o tome kako se veoma često odluke donose na osnovu nedovoljno jasnih informacija i bez potpunog razumevanja tretirane problematike. Ovo ne podrazumeva donošenje odluka velikih težina sa visokim nivoom odgovornosti, već je u većini slučajeva reč o predlogu mera za ublažavanje i izbegavanje problema, a ne o konkretnom rešavanju.

Ivanović je 2013. godine u svom radu prikazao primer korišćenja rezultata modeliranja u proceduri donošenja odluke (Ivanović et al., 2013). Cilj istraživanja

je bio izbor scenarija za rekonstruisanje saobraćajnice u pešačku zonu. Analizirano je nekoliko scenarija. Rezultati modeliranja funkcionalnih pokazatelja saobraćajnog sistema iz transportnog modela dali su jako bliske rezultate za svaki od analiziranih scenarija, što je otežalo izbor. U konkretnom slučaju, kao podrška kvantitativno dobijenim rezultatima modeliranja, primenjena je višekriterijumska ANP analiza (ANP - Analytic network process). Kombinacijom rezultata modeliranja i primenjenom višekriterijumskom analizom usvojeno je optimalno rešenje.

Bez obzira o kom pristupu odlučivanja je reč, da bi model ostvario svoju osnovnu funkciju i da bi doprineo procesima donošenja odluke, mora da ga odlikuje tačnost i preciznost. U kontekstu preciznosti podrazumeva se jedinica mere u analizi izlaznih rezultata. Takođe je značajno jasno utvrditi da li je reč o strateškom ili operativnom nivou odlučivanja pa u odnosu na to definisati nivo detaljnosti modela.

Treba imati u vidu da u praksi svi modeli pretpostavljaju da su neke promenljive egzogene u odnosu na model. Pored toga, mnoge druge promenljive su svesno izostavljene iz modeliranja zbog različitih razloga: pojedine promenljive je teško prognozirati, kod pojedinih promenljivih se očekuje bezznačajna promena, pojedine promenljive ne utiču na sistem u okviru koga se modelira, itd. (Ortúzar & Willumsen, 2011). Eksplicitno razmatranje promenljivih koje nisu uvrštene u model može pomoći u odluci da li je model odgovarajući za konkretan problem koji se rešava. Kvalitet i pouzdanost odgovarajućih ulaznih podataka u velikoj meri utiče na kvalitet izlaznih rezultata modeliranja.

Posmatrajući uličnu mrežu, ponuda transportnog sistema se može okarakterisati kapacitetom ulične mreže. Kratkoročno gledajući, u kapacitetu ulične mreže nema velikih varijacija. Međutim, u dugoročnim prognozama, modeli ne mogu uzeti u obzir potencijalne odluke gradske vlasti o eventualnim rekonstrukcijama pojedinih saobraćajnica, promeni načina upravljanja i ostalih elementa koji mogu dovesti do promena ponudi transportnog sistema. Modeli su uglavnom bazirani na proceni kako će se troškovi (vreme putovanja, potrošnja goriva, emisije štetnih gasova, itd)

menjati za različite veličine transportnih zahteva. S tim u vezi, može se steći utisak o važnosti tretiranja uticaja vremenskih prilika u procedurama modeliranja opterećenja ulične mreže, naročito ukoliko se pokaže da je uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na pomenute kategorije troškova značajan.

2.3.2. Modeliranje raspodele opterećenja na uličnoj mreži

Na osnovu saobraćajnih istraživanja dobijaju se podaci o karakteristikama kretanja. Jednu od osnovnih karakteristika kretanja predstavlja prostorna raspodela kretanja. Ukoliko je analizirano područje podeljeno na manje prostorne jedinice, na primer saobraćajne zone, prostorna raspodela kretanja predstavlja se matricom međuzonskih kretanja. Modeliranje raspodele opterećenja ulične mreže, u principu predstavlja aplikaciju matrice međuzonskih kretanja na uličnu mrežu, uz poštovanja niza kriterijuma i pravila. Kriterijumi i pravila su tu da obezbede da dobijena saobraćajna slika bude što realnija.

Na osnovu izloženog, dolazi se do zaključka da je za modeliranje opterećenja ulične mreže potrebno obezbediti tri neophodna ulazna elementa:

1. Matricu kretanja koja opisuje transportne zahteve na analiziranom području. Uglavnom se matrica transportnih zahteva formira za periode sa najvećim intenzitetom ispostavljanja transportnih zahteva na uličnoj mreži, takozvane vršne periode, mada se matrice mogu realizovati i za ostale periode u toku dana.
2. Kvalitetno kodiranu uličnu mrežu sa definisanim tehničkim i eksploatacionim karakteristikama.
3. Metodu raspodele opterećenja koja će primenom definisanih procedura i kriterijuma, raspodeliti saobraćajno opterećenje po uličnoj mreži.

Ukoliko se utvrde realni transportni zahtevi, i kodira ulična mreža, dolazi se do pitanja: "koju metodu raspodele opterećenja primeniti tako da se na najbolji način predstavi ponašanje korisnika u smislu izbora rute kretanja na uličnoj mreži"? Upotreba određene metode zavisice od raspoložive ulazne baze podataka (I-C

matrica), svrhe ispitivanja saobraćajne mreže kao i poznavanja karakteristika mreže i ponašanja putnika (Vukanović, 1997).

Većina modela raspodele saobraćajnog opterećenja bazirana je na donošenju odluka na nivou pojedinca. Modeliranje ponašanja korisnika je veoma složen zadatak, sa velikim brojem promenljivih faktora uticaja koje treba uzeti u obzir (vreme putovanja, rastojanje, troškovi putovanja, bezbednost, komfor itd.). Pojedine faktore uticaja je vrlo teško kvantitativno izraziti, što dodatno otežava proceduru modeliranja izbora rute. Bazna pretpostavka kod modela za izbor trase putovanja je, da korisnik uvek bira trasu za koju smatra da mu obezbeđuje najpovoljnije uslove putovanja u odnosu na razmatrane kriterijume.

Kao dva najčešće postavljena kriterijuma u modelima izbora trase kretanja izdvajaju se: minimalno vreme putovanja i minimalni troškovi. U daljem tekstu će se za pomenute faktore uticaja na kretanje duž deonice/trase koristiti termin "otpor" deonice/trase. Pojedine procedure omogućavaju da se na osnovu vrednosti pomenuta dva faktora generalizuje opšti pokazatelj izbora. Prethodna istraživanja su pokazala da se kao jedan od najčešće korišćenih kriterijuma u modelima raspodele opterećenja ulične mreže koristi vreme putovanja (Ortúzar & Willumsen, 2011). Ono što je teško implementirati u model jeste ponašanje samog korisnika. Postoji veliki broj istraživanja u kojima je utvrđeno da razlika u percepciji vremena putovanja i realnog vremena putovanja postoji. Takođe je ocenjeno da kombinacija vremena i rastojanja, u svrhu generalizacije troškova, daje najbolje rezultate. Međutim, čak i na taj način, moguće je objasniti od 60 do 80% izbora rute putovanja dok na ostatak može pripisati razlikama u percepciji, nepotpunim informacijama o troškovima ili jednostavno greškama (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Činjenica da različiti vozači često biraju različite trase kretanja između dve iste tačke, može se objasniti na nekoliko načina:

- Razlike u individualnim percepcijama, šta zapravo čini neku rutu najboljom. Za nekoga je to trasa koja obezbeđuje minimalno vreme putovanja, za

nekoga minimalnu potrošnja goriva, za nekoga kombinacija više faktora. U svakom slučaju, i kada je isti faktor za izbor rute u pitanju, mogu postojati značajne razlike u percepcijama. Kao odgovor na ovu pojavu često se vrši kategorizacija korisnika, u odnosu na različite kriterijume.

- Nivo poznavanja alternativnih ruta varira, što rezultuje prividnom iracionalnošću u izboru. U ovom segmentu se primenjuju stohastičke metode za izbor trase koji uzimaju u obzir i opseg slučajnih uticajnih faktora koji mogu dovesti do promene odluka korisnika.
- Efekti zagušenja prvenstveno pogađaju najkraće trase putovanja čineći ih, u pogledu generalisanih troškova, uporedivim i manje atraktivnim u odnosu na inicijalno nepovoljnije trase. U ovim situacijama se koristi neki od ravnotežnih modela raspodele saobraćaja na mreži.

Veliki uticaj u kreiranju modela izbora trase imao je engleski inženjer John Glen Wardrop (1952), koji je proučavao fenomen raspodele saobraćaja na mreži, uzimajući u obzir funkcionalne zavisnosti između vremena putovanja i intenziteta protoka saobraćaja (Wardrop, 1952). Wardrop je uočio da se saobraćajno opterećenja na uličnoj mreži raspodeljuje tako da dolazi do ravnoteže, odnosno ekvilibrijuma mreže. S tim u vezi, postavio je dva osnovna principa ekvilibrijuma saobraćajne mreže. Prvi princip glasi: "Vremena putovanja na svim rutama koje se koriste su manja ili jednaka od vremena putovanja koji bi vozilo imalo na bilo kojoj alternativnoj ruti koja se ne koristi."

Prvi Wardrop-ov princip je deterministički s obzirom da pretpostavlja da korisnik uvek bira trasu sa najkraćim vremenom putovanja, imajući pri tome precizne informacije o vremenima putovanja na alternativnim trasama (Holden, 1989). Ono što je u kasnijim istraživanjima postala tema u vezi sa ovim Wardrop-ovim principom je u kojoj meri korisnik precizno percipira vreme putovanja u odnosu na realno vreme putovanja pri izboru trase. Modeli bazirani na prvom Wardrop-ovom principu nazivaju se korisničkim.

Drugi Wardrop-ov princip vezan je za optimizaciju vremena putovanja na nivou celog saobraćajnog sistema i glasi: "Prosečno vreme putovanja je minimalno."

Ovakvo stanje sistema ne uzima u obzir pojedinca kao donosioca odluke, jer je funkcija cilja višeg hijerarhijskog nivoa. Modeli bazirani na drugom Wardrop-ovom principu nazivaju se sistemskim ili normativnim.

Smiljan Vukanović je u svojoj knjizi (Vukanović, 1997) modele raspodele saobraćaja na uličnoj mreži, u odnosu na prvi Wardrop-ov princip, podelio na ravnotežne i modele neravnotežnih stanja.

U principu, mogu se izdvojiti tri osnovne metode opterećenja ulične mreže: sve ili ništa, ekvilibrijum i stohastičke metode. Detaljnije pojašnjenje pomenutih metoda dato je u Prilogu I.

Kako je i navedeno, u opredeljenju za primenom konkretne metode raspodele saobraćajnog opterećenja figuriše niz kriterijuma. Ideja disertacije je da se kroz istraživanja utvrde zakonitosti u uticaju nepovoljnih vremenskih prilika koje bi se mogle implementirati bez obzira na izbor metode raspodele saobraćaja. Zajedničko za svaki algoritam je da se raspodela vrši u odnosu na faktor otpora kojim se karakteriše deonica. U najvećem broju prikazanih metoda pod osnovnim faktorom otpora na deonici podrazumevano je vreme putovanja. Ukoliko bi se istraživanjem kvantifikovao uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja na deonici, ukazala bi se mogućnost za prilagođavanjem procedure modeliranja uspostavljenim zakonitostima između vremena putovanja i uticaju nepovoljnih vremenskih prilika. U procedurama modeliranja, vreme putovanja na deonici je opisano funkcijama vremena putovanja. One opisuju zavisnosti promene vremena putovanja (ili brzine kretanja vozila) u odnosu na stepen iskorišćenja kapaciteta i predstavljaju jedan od najvažnijih ulaznih podataka u procedure modeliranja. Imajući u vidu parametre koji figurišu u funkcijama vremena putovanja, istraživanja će biti fokusirana na utvrđivanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže i vremene putovanja (brzine kretanja vozila) na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. Uključivanje funkcija vremena putovanja, koje su prilagođene uticaju nepovoljnih vremenskih prilika, u proceduru modeliranja doprineće realnijim rezultatima modeliranja u uslovima nepovoljnih vremenskih prilika. To posebno može da bude značajno kada je reč o optimizaciji kapaciteta ulične mreže.

2.3.3. Funkcije vremena putovanja u modeliranju opterećenja ulične mreže

Modeli imaju važnu ulogu kada je reč o investicionim strategijama razvoja transportnog sistema. Vreme putovanja, kao ključni element evaluacije troškova putovanja, je veoma važno u procedurama opterećenja ulične mreže. Ukoliko je izbor trase baziran na vremenu putovanja, dobro formirana funkcija vremena putovanja omogućava modeliranje ponašanja korisnika na uličnoj mreži u izboru trase kretanja (Suh, Park, & Kim, 1990).

Za svaku deonicu na uličnoj mreži, uopšteno posmatrajući, može se reći da brzina kretanja vozila opada kako protok saobraćaja raste. Ovakva zakonitost promena veličina važi do vrednosti kritične gustine (gustina pri kojoj je dostignut kapacitet saobraćajnice). Nakon toga i protok i brzina počinju da opadaju. Formiranje funkcije zavisnosti ove dve veličine, za potrebe modeliranja saobraćajnog opterećenja sadrži ograničenja. Na primer, izvorni odnos zavisnosti protoka saobraćaja i brzine definisan od strane Greenshields-a 1933. godine ne daje jedinstvenu vrednost brzine za iste vrednosti protoka.

U modelima raspodele saobraćajnog opterećenja postoje različiti faktori otpora u odnosu na koje se realizuje raspodela saobraćaja, od izvorne do ciljne tačke, na alternativne trase. Jedan od osnovnih faktora otpora, kako je već pomenuto, predstavlja vreme putovanja, odnosno pretpostavka u većini modela je da korisnik uvek bira trasu sa najkraćim vremenom putovanja.

U praksi modeliranja saobraćajnog opterećenja, vreme putovanja na posmatranoj deonici se opisuje funkcijama zavisnosti promene vremena putovanja (ili brzine) u odnosu na vrednosti protoka saobraćaja. Kroz literaturu se može naići na veliki broj različitih naziva za ove funkcije, funkcija vremena putovanja (*travel time function*), funkcija zagušenja deonice (*link congestion function*), funkcija kapaciteta deonice (*link capacity functions*), funkcija "protok - vremenski gubitak" (*volume delay function*), funkcija troškova na deonici (*link cost function*) i druge. U okviru disertacije za zavisnost navedenih veličina biće usvojen i korišćen termin funkcija vremena putovanja (FVP).

Većina funkcionalnih zavisnosti kojima su predstavljene FVP polazi od definisanog vremena putovanja u uslovima slobodnog toka. U zavisnosti od promene uslova i vreme putovanja se menja, odnosno raste. Bez obzira o kojoj funkcionalnoj zavisnosti vremena putovanja i protoka saobraćaja je reč, povezuje ih jedna zajednička osobina. Pri niskim vrednostima protoka saobraćaja, promena protoka ima dosta manji uticaj na povećanje vremena putovanja u odnosu na istu promenu protoka saobraćaja pri vrednostima protoka saobraćaja bliskim kapacitetu. Zato je posebno važno ispitati pri kojim vrednostima protoka saobraćaja vreme putovanja postaje osetljivo na promene u protoku saobraćaja.

Kada je reč o formiranju transportnih modela, FVP predstavlja jedan od osnovnih ulaznih parametara za modeliranje raspodele saobraćajnog opterećenja na uličnoj mreži. Ova konstatacija podrazumeva da je reč o modelu raspodele saobraćaja baziranom na vremenima putovanja na alternativnim trasama.

Praktična primena modela raspodele saobraćajnog opterećenja na određenom području podrazumeva korišćenje jednog tipa FVP. Međutim, parametri koji definišu funkciju, prilagođavaju se u odnosu na karakteristike i kategorije saobraćajnica.

Za potrebe formiranja transportnih modela, poželjno bi bilo definisati jedan opšti obrazac kojim je definisana zavisnost vremena putovanja u odnosu na protok, i koji bi bio univerzalan. To bi podrazumevalo poznavanje promene parametara funkcije u zavisnosti od karakteristika saobraćajnice. Utvrđivanjem ovih zakonitosti u okviru ulične mreže jednog područja bilo bi moguće predvideti vreme putovanja na drugoj uličnoj mreži poznavajući karakteristike saobraćajnice i vrednosti protoka saobraćaja. Nažalost, uopštavanje ovog tipa je neizvodljivo. Svaku saobraćajnu mrežu, kao i svaku saobraćajnicu karakterišu specifičnosti koje onemogućavaju uopštavanja po pitanju definisanja FVP.

U početku, razvoj FVP nije imao značajnu ulogu u procedurama opterećenja saobraćajne mreže. Jedan od osnovnih razloga je taj što za grubo predstavljanje saobraćajnog opterećenja na mreži, na makro nivou, nije bilo neophodno definisati

precizne funkcije vremena putovanja. Sa druge strane, i proces utvrđivanja FVP je bio veoma zahtevan i kompleksan. Takođe je postojalo dosta neslaganja od strane istraživača koji su se bavili ispitivanjem ove funkcionalne zavisnosti, što je kao rezultat dalo veliki broj različitih funkcija. Stiče se utisak, da je u periodu razvoja modeliranja saobraćaja za potrebe opterećenja transportne mreže svake značajnije saobraćajne studije formiran i novi tip FVP. Detalji vezani za razvoj funkcije vremena putovanja, kao i najznačajniji tipovi funkcija vremena putovanja predstavljeni su u Prilogu II.

2.3.4. Ograničenja i kriterijumi u formiranju funkcije vremena putovanja

Na osnovu iskustava primene FVP u procedurama modeliranja raspodele saobraćajnog opterećenja na uličnoj mreži mogu se identifikovati tri osnovna pristupa (TMIP, 2014):

1. *primena jedinstvene FVP za celokupnu uličnu i putnu mrežu.* Kada je reč o ovakvom pristupu kao najčešće korišćena je BPR funkcija. U tom slučaju mogu da budu korišćene izvorno definisane vrednosti za koeficijente¹ α i β , ili da se primene prilagođene vrednosti koeficijenata.
2. *primena jedinstvenih funkcija vremena putovanja u zavisnosti od kategorije saobraćajnica.* Ovakav pristup zahteva prethodna istraživanja vezana za procenu brzine i vremena putovanja na saobraćajnicama različitih kategorija.
3. *primena jedinstvenih funkcija vremena putovanja koje uzimaju u obzir i vremenske gubitke na signalisanim raskrsnicama.* U zavisnosti od raspoložive baze podataka o signalisanim raskrsnicama, u ukupno vreme putovanja na saobraćajnicama različitih kategorija u tom slučaju su implementirani i vremenski gubici na raskrsnicama.

U zavisnosti od primenjenog pristupa, bira se FVP koja na najbolji način opisuje zavisnost između vremena putovanja i koeficijenta iskorišćenja kapaciteta, u

¹ Pojašnjeno u Prilogu 2

odnosu na karakteristike ulične mreže. Pogodnost kod softvera novije generacije, koji se koriste u planiranju saobraćaja, je u tome što pružaju mogućnost definisanja sasvim nove, jedinstvene, FVP u skladu sa karakteristikama područja istraživanja i primenjenog modela.

Kada je reč o primeni FVP u prognozi transportnih potreba identifikovano je nekoliko ograničenja (Horowitz, 1991):

1. Vremenski gubici na deonici su u funkciji protoka saobraćaja samo na toj deonici.
2. Frank Vulfov algoritam, koji se koristi kod ekvilibrijum modela saobraćajnog opterećenja, ne može da "rukuje" gubicima u funkciji saobraćajnog opterećenja više linkova. Osim toga, FVP ne sme da bude diskontinuitetna, i mora isključivo da raste sa porastom protoka saobraćaja. Takođe, mora da obezbedi jednostavnu analitičku integraciju.
3. Veliki broj modela raspodele saobraćajnog opterećenja dozvoljava korišćenje samo jednog oblika funkcije vremena putovanja.
4. Veliki broj modela ne obezbeđuje mogućnost izračunavanja vremenskih gubitaka u skretanjima u funkciji protoka saobraćaja.
5. Algoritmi pojedinih modela raspodele saobraćajnog opterećenja, naročito u prvim iteracijama, omogućavaju pojavu vrednosti protoka saobraćaja na deonici koji prevazilazi kapacitet. Zbog toga je neophodno FVP projektovati i za vrednosti stepena zasićenja $q/C > 1$.

Kao što je navedeno, većina savremenih softvera koji se koriste u planiranju saobraćaja pruža mogućnost kreiranja jedinstvene funkcije vremena putovanja. U radu Spiess-a iz 1990. godine navedeni su neophodni kriterijumi i preporuke koje bi FVP morala da ispunjava (Spiess, 1990):

1. $f(x)$ da strogo raste, sa povećanjem odnosa q/C , i pri tome da konvergira određenoj vrednosti.

2. $f(0)=1$ i $f(1)=2$. Ovaj uslov se poklapa sa logikom BPR funkcije vremena putovanja. Ovo znači da se vreme putovanja pri kapacitetu povećava dva puta u odnosu na vreme putovanja u uslovima slobodnog toka.
3. $f'(x)$ postoji i strogo raste. Ovaj uslov obezbeđuje konveksnost funkcije zagušenja. Nije neophodan, ali je vrlo poželjan uslov.
4. $f'(x)=\alpha$. Parametar koji definiše nagib krive, odnosno koliko brzo dolazi do zagušenja u slučaju postizanja kapaciteta.
5. $f'(x)<M\alpha$, gde je M pozitivna konstanta. Nagib funkcije zagušenja je ograničen. Na ovaj način se ograničava i moguća vrednost vremena putovanja za odnose protoka i kapaciteta koji su veći od jedinice (problem naveden kod BPR funkcije).
6. $f'(0)>0$. Ovaj uslov garantuje jedinstvenost opterećenja deonice. Donosi stabilnost u slučaju pojave grešaka, i raspoređuje opterećenje na alternativne nezagušene rute proporcionalno njihovim kapacitetima.
7. Procena $f(x)$ ne bi trebalo da oduzima više vremena nego što je potrebno za formiranje BPR funkcije

Horowitz u svom radu iz 1991. godine navodi se da bi kriterijum pod rednim brojem 2. trebalo preformulisati na sledeći način: Funkcija treba da obezbedi realne vrednosti vremenskih gubitaka u opsegu protoka saobraćaja između nule i vrednosti bliske kapacitetu, naročito za te granične vrednosti (Horowitz, 1991).

U cilju olakšanja potrage za „idealnom“ FVP, može se obratiti pažnja na rezultate testiranja primene nekoliko funkcija FVP u model raspodele saobraćajnog opterećenja ekvilibrijum (Dowling & Skabardonis, 2008). Rezultati testiranja predstavljeni su u tabeli 2. FVP su izražene preko brzine.

zahtevi pod uticajem vremena putovanja (Zhen, 2007). U zavisnosti od toga da li je reč o statičkim ili dinamičkim modelima, vreme putovanja se modelira na drugačiji način, ali zajednički imenitelj kod oba pristupa je kriterijum da definisano vreme putovanja u što većoj meri odgovara realnom vremenu putovanja na uličnoj mreži. Ispunjavanjem ovog kriterijuma, modelovana raspodela saobraćaja dobija na kvalitetu.

Iz tabele 2 primećuje se da pojedine FVP ne sadrže elemente vezane za signalne planove, odnosno ne razmatraju posebno vremenske gubitke na raskrsnici. Kod ovakve vrste FVP, vremenski gubici na raskrsnici modeliraju se kroz uticaj na vrednost kapaciteta, ili korekcijom koeficijenata koji figurišu u funkciji.

Horowitz je, u okviru svojih istraživanja, pokušao da kalibriše i uporedi FVP koje u svojoj formulaciji ne sadrže eksplicitno vremenske gubitke na raskrsnici, u odnosu na metodologiju proračuna vremenskih gubitaka iz priručnika HCM (Horowitz, 1991). Analizirane su BPR, Konusna i Overgardova funkcija. Analiza je pokazala da BPR i Overgardova funkcija približnije aproksimiraju HCM funkciju vremenskih gubitaka, dok je Konusna funkcija dala lošije rezultate. Vrednosti parametara BPR funkcije koja je dala najbolje rezultate su $\alpha=5$ i $\beta=3.5$. Iako je moguće kalibrisati BPR funkciju prema HCM-ovoj funkciji vremenskih gubitaka, navodi se da to nije poželjno iz nekoliko razloga:

1. Različit set parametara (α i β) bilo bi potrebno definisati za svaku kombinaciju dužina ciklusa, vremena trajanja zelenog signalnog pojma, zasićenog toka i tipa nailaska toka vozila.
2. Rezultati BPR funkcije značajno odstupaju od HCM funkcije u uslovima zasićenja.
3. Kompleksnija je procedura kodiranja mreže.
4. Vremenski gubici u procesu ubrzanja nisu tretirani.

Ukoliko je reč o prognozi kapaciteta transportnog sistema koji treba da odgovori na buduće transportne zahteve, problem implementacije vremenskih gubitaka na raskrsnici je vezan i za nepoznavanje budućih signalnih planova. Za analizu

raspodele saobraćajnog opterećenja u baznoj godini podaci bi bili poznati, ali je vrlo teško pretpostaviti karakteristike raskrsnica u nekom budućem periodu. Ipak, i kada je u pitanju prognoza, vremenski gubici na raskrsnici ne bi smeli u potpunosti da budu izostavljeni. Navedene činjenice dovele su do zaključka da optimalno rešenje predstavlja pojednostavljeno proračuna vremenskih gubitaka u procedurama planiranja saobraćaja. Važno je da proračun bude baziran na logičkim i jednostavnim relacijama koje obezbeđuju zadovoljavajući nivo preciznosti.

Lu i ostali (2010), rukovodeći se navedenim nedostacima, predložili su model za proračun vremena putovanja koji bi i u modeliranju budućih transportnih potreba uzimao u obzir vremenske gubitke na raskrsnici (Lu, Zhao, & Hadi, 2010). Istaknute su tri osnovne prednosti predloženog modela.

1. Model uzima u obzir efekte signalisane raskrsnice za različite vrednosti protoka saobraćaja, ne zahtevajući podatke o signalnom planu.
2. Vremenski gubici na deonicama različitih dužina se procenjuju na osnovu prostorne raspodele gubitaka duž linka.
3. Presentovani model unapređuje preciznost procene vremena putovanja u odnosu na postojeće modele.

Kao osnovni elementi od uticaja na vreme putovanja podrazumevani su dužina deonice, protok saobraćaja, intenzitet saobraćaja na sporednim prilazima i stepen zasićenja. Na osnovu rezultata simulacije dobijen je sledeći oblik nelinearne zavisnosti između vremenskih gubitaka i protoka saobraćaja:

$$t = a_1L + X_{sub} \left[a_2 + a_3 \frac{(X_{cross})^{a_4}}{(X_{sub})^{a_5}} \right] \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-a_6L}{X_{sub}} \right] \right\}$$

t – ukupni vremenski gubici na deonici dužine L

L – dužina deonice

X_{sub} – stepen zasićenja merodavne grupe saobraćajnih traka na glavnom pravcu

X_{cross} – stepen zasićenja merodavne grupe saobraćajnih traka na sporednom pravcu

$a_1...a_6$ – parametri za kalibraciju

Stepen zasićenja je definisan kao:

$$X_{sub} = \frac{V_{sub}}{C_{sub}} \quad X_{cross} = \frac{V_{cross}}{C_{cross}}$$

v – protok saobraćaja na merodavnim saobraćajnim trakama

c – kapacitet merodavnih saobraćajnih traka

Vrednosti parametara za kalibraciju od a_1 do a_6 su definisani za svih devet tipova raskrsnica analiziranih simulacijom. Pokazano je da testirani model obezbeđuje dobru preciznost prognoze vremena putovanja kako za uslove nezasićenog, tako i za uslove zasićenog stanja.

U okviru malih uličnih mreža, vremenski gubici na raskrsnici mogu se proračunati detaljno na svakoj raskrsnici, ali kada je reč o velikoj uličnoj mreži, ovaj zadatak postaje kompleksan. Za potrebe transportnog modela Teherana razvijeni su modeli proračuna vremenskih gubitaka, kako na signalisanim, tako i na nesignalisanim raskrsnicama (Aashtiani & Iravani, 2002). Dve pretpostavke na kojima je baziran model podrazumevale su da:

- sva skretanja koja se nalaze na zajedničkom prilazu raskrsnici imaju iste vremenske gubitke i
- vremenski gubici na prilazu raskrsnici zavise od tehničkih karakteristika prilazne deonice, načina upravljanja raskrsnicom i protoka saobraćaja na prilaznoj deonici

Postoje i modeli, u okviru kojih su za procenu vremenskih gubitaka na signalisanoj raskrsnici u modeliranju opterećenja ulične mreže korišćene heurističke metode i metode veštačke inteligencije. Ding (2009) u svom radu koristi veštačke neuronske mreže za predviđanje vremenskih gubitaka na raskrsnici (Ding, Zhao, & Wu, 2009). U navedenom radu, pretpostavka za formiranje modela procene vremenskih gubitaka je da su signalni planovi optimizirani u skladu sa postojećim saobraćajnim uslovima i da konvergencija u proceduri raspodele opterećenja može biti ostvarena ukoliko se vremenski gubici na raskrsnici uzmu u obzir.

U modeliranju raspodele saobraćajnog opterećenja regije Montreal baziranog na GIS-u, razvijen je model koji je uzimao u obzir vremenske gubitke na raskrsnici na veoma pojednostavljen način (Haider & Spurr, 2006). Svakom od tipova skretanja dodeljeni su „penali“ u vidu definisanja konstantnog vremena prolaska kroz raskrnicu, 30 sekundi za leva skretanja, 12 sekundi za desna skretanja i 3 sekunde za prolazak pravo. Definisanje fiksni vrednosti vremenskih gubitaka je veoma pojednostavljena pretpostavka koja ignoriše uticaj intenziteta saobraćaja na raskrsnici na vremenske gubitke. Ovakav način modeliranja može dati loše rezultate za visoke vrednosti protoka saobraćaja. U konkretnom istraživanju, za proračun vremena putovanja na deonici, korišćena je BPR funkcija sa promenljivim vrednostima parametara α i β u zavisnosti od kategorije deonice.

3. PREGLED LITERATURE

Pregled literature je koncipiran iz tri dela. U prvom delu biće reči o istraživanjima vezanim za uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na neprekinute saobraćajne tokove. Najranija istraživanja iz ove oblasti vezana su za vangradsku mrežu, odnosno neprekinute saobraćajne tokove. Nakon toga, biće dat prikaz istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na prekinute saobraćajne tokove. U okviru ovog dela pregleda, predmet istraživanja predstavljaju segmenti ulične mreže što je u skladu sa tretiranom problematikom disertacije. Treći deo pregleda obuhvata istraživanja u okviru kojih je realizovana evaluacija efekata uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na elemente ponude saobraćajnog sistema na većem prostornom obuhvatu gradskog područja, odnosno na makro nivou.

3.1 UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA NA NEPREKINUTE SAOBRAĆAJNE TOKOVE

Neprekinuti saobraćajni tokovi uglavnom se vezuju za delove mreže puteva najviše kategorije (autoput, magistrala), na kojima ne postoje elementi upravljanja saobraćajem kao što su signalisane raskrsnice ili znakovi zaustavljanja koji bi omogućili prekidanje toka. Istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika su u početnoj fazi, u većoj meri realizovana na saobraćajnicama viših rangova, koje karakterišu neprekinuti saobraćajni tokovi. Pretpostavka je da je jedan od razloga bila jednostavnija procedura utvrđivanja promene u funkcionalnim zavisnostima između osnovnih parametara saobraćajnog toka², pod uticajem vremenskih prilika. Izborom ovog tipa saobraćajnice, eliminisani su pojedini uticaji koji bi mogli da utiču na varijacije u posmatranim veličinama (raskrsnice, stajališta javnog prevoza, parkiranje i slično). Sa druge strane, prva savremenija oprema vezana za snimanje karakteristika saobraćajnog toka, uglavnom je ugrađivana na saobraćajnicama visokog kapaciteta za koje su karakteristična velika saobraćajna opterećenja.

² Osnovni parametri saobraćajnog toka – protok, brzina i gustina saobraćaja

Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet

Jedan od prvih radova u kojima je analiziran uticaj vremenskih prilika na neki od parametara saobraćajnog toka je objavljen 1952. godine. U radu su prikazani rezultati istraživanja uticaja vremenskih prilika na protok saobraćaja koja su sprovedena na 21 lokaciji širom Velike Britanije, u dva vremenska preseka (Tanner, 1952). Prvo istraživanje je realizovano od 15. do 21. avgusta 1949. godine, dok je ponovljeno istraživanje realizovano od 14. do 20. avgusta 1950. godine. Za vreme perioda istraživanja 1949. godine nije bilo padavina, dok su period istraživanja tokom 1950. godine karakterisali kišni dani. Podatak o prosečnom intenzitetu kiše je dobijen sa meteorološke stanice koja se nalazila u uticajnoj zoni lokacija istraživanja. Rezultati istraživanja pokazali su da postoji visoka negativna korelacija između padavina i intenziteta protoka saobraćaja. Autor je došao do zaključka da za promenu intenziteta padavina od 1mm/h, protok saobraćaja opada od 1.3 do 3.1 %. Iako se u metodologiji istraživanja sprovedenog pre oko 60 godina može pronaći veliki broj nedostataka, tematika uticaja padavina, kao jednog oblika vremenskih prilika na karakteristike saobraćajnog toka, privukla je pažnju istraživača iz oblasti saobraćaja.

Rezultati istraživanja uticaja vremenskih prilika na karakteristike saobraćajnog toka doveli su do zaključka da izostavljanje vremenskih prilika i uslova vidljivosti, kao značajnog faktora u procedurama utvrđivanja kapaciteta, predstavlja nedostatak (Moskowitz & Newman, 1963).

Veliki broj istraživanja na temu uticaja tehničkih karakteristika saobraćajnice i karakteristika saobraćajnog toka na kapacitet podstakao je istraživače da se orijentišu na ispitivanje efekata faktora okruženja na kapacitet (Jones & Goolsby, 1970). Pod faktorima okruženja podrazumevana je temperatura, vetar, vidljivost, kišu, sneg, magla i led. U navedenom radu, istraživanja su sprovedena na jednoj deonici autoputa. Ispitivane su promene kapaciteta za dve kategorije vremenskih prilika, za suvo vreme i za kišno vreme. Važno je napomenuti da intenzitet kiše nije uzet u razmatranje, a zabeležena redukcija kapaciteta se kretala između 14 i 19%.

Navedeno je nekoliko važnih okolnosti na koje treba obratiti pažnju kada je reč o ispitivanju ove zavisnosti i primeni odgovarajućih strategija upravljanja saobraćajem u odnosu na vremenske prilike. Ukoliko je procedura upravljanja saobraćajem takva da se upravlja u realnom vremenu, može doći do situacije da:

- zabeležena promena u protoku saobraćaja nije nastala kao posledica kiše, što može dovesti do primene neodgovarajućih mera;
- ukoliko je primena odgovarajuće mere uslovljena merenjem promena vrednosti pokazatelja, postoji mogućnost da će za taj vremenski period (dok se obavi merenje) već značajno opasti nivo usluge na deonici;
- potreba za korektivnim delovanjem, umesto unapred pripremljenog preventivnog delovanja, uslovljava primenu mera čije su vrednosti većih tolerancija kako ne bi došlo do zagušenja.

Često su rezultati istraživanja poređeni sa inženjerskim priručnikom „Highway Capacity Manual“ (HCM) u cilju potvrde ili opovrgavanja predstavljenih rezultata. Kleitsch i Cleveland (1971) su jedan od osnovnih motiva za realizacijom istraživanja našli u hipotezi da vremenske prilike, konkretno kiša, ima značajniji uticaj na kapacitet od vrednosti koje su definisane u priručniku HCM iz 1965. godine (Kleitsch & Cleveland, 1971). Istraživanje je realizovano na pet deonica autoputa u Mičigenu. Rezultati su prikazali redukciju kapaciteta za oko 8%, dok su se u pomenutom priručniku rezultati smanjenja kretali između 2 i 3%. Mereći prosečnu brzinu kretanja na analiziranim deonicama dobijeni rezultati su pokazali da kiša prouzrokuje veća vremena putovanja. Na osnovu te činjenice, u radu je pretpostavljeno da se i vrednost brzine slobodnog toka smanjuje pod uticajem kiše, ali uticaj nije kvantifikovan.

Ries (1981) je došao do rezultata da kapacitet deonice autoputa pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika opada za oko 8% za vreme kišnih dana, i da na svaku dodatnu količinu kiše od 0.25mm kapacitet opada za 0.6% (Ries, 1981).

Rezultati istraživanja koje su realizovali i publikovali Ibrahim i Hall (1994) predstavljaju jedan od najznačajnijih članaka iz oblasti istraživanja uticaja

nepovoljnih vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka (Ibrahim & Hall, 1994). Cilj istraživanja je bio da se pored kvantifikacije efekata uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka, dobijeni uticaj implementira u sistem upravljanja saobraćajem na autoputu. Podaci o saobraćaju prikupljeni su uz pomoć sistema za upravljanje saobraćajem na deonici autoputa Kraljica Elizabeta, Misisoga (Ontario). Karakteristike vremenskih prilika su prikupljane sa meteorološke stanice. Istraživanja su trajala 10 dana (6 dana bez padavina, dva dana sa snegom i dva dana sa kišom), a sprovedena su tokom oktobra, novembra i decembra 1990. godine kao i januara i februara 1991. godine. Formirani su regresioni modeli koji opisuju odnose analiziranih parametara saobraćajnog toka za idealne vremenske prilike. U narednom koraku su rezultati promena vrednosti parametara saobraćajnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika implementirani u formirane modele. U okviru istraživanja nisu postojali egzaktni podaci o intenzitetu padavina, već je kiša kategorisana na kišu slabog i jakog intenziteta. Rezultati su pokazali da kiša slabog intenziteta nema veliki uticaj na kapacitet, osim ukoliko trajanje kiše ne prouzrokuje značajnu količinu vode na kolovozu. Zabeleženo je da kiša jakog intenziteta utiče na smanjenje vidljivosti i tako ostvaruje značajniji uticaj na saobraćajni tok. Zabeležene promene u maksimalnim vrednostima protoka saobraćaja, preko kojih je ocenjivan kapacitet, pokazale su da se za vreme kiša jakog intenziteta smanjenje kreće između 10 i 20%, u odnosu na vremenske uslove bez padavina. Takođe je dobijeno da sneg jakog intenziteta utiče na smanjenje maksimalne vrednosti protoka saobraćaja između 30 i 48%.

Podaci zabeleženi na deonicama autoputa u Nemačkoj, iskorišćeni su za kalibraciju funkcije brzina-protok prema različitim uslovima okruženja (Brilon & Ponzlet, 1996). Istraživanja se nisu samo odnosila na segment uticaja vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka već su uzeti u obzir i ostali elementi okruženja kao što su razlike između dnevne i noćne vožnje, vikenda i radnih dana, i lokacija istraživanja. Podaci o saobraćaju su prikupljeni u periodu od tri godine, na 15 lokacija sa automatskim brojačima saobraćaja. Posebno značajan podatak u formiranju modela zavisnosti predstavljalo je učešće teških teretnih vozila u

saobraćajnom toku. Podaci o meteorološkim karakteristikama prikupljeni su iz meteorološke stanice koja se nalazila na udaljenosti od 5 do 50 km od lokacija brojača. Udaljenost meteorološke stanice se navodi kao nedostatak za preciznu kvantifikaciju meteoroloških uslova. Iz tog razloga analiza je pojednostavljena i saobraćajni parametri su posmatrani u odnosu na sledeće kriterijume vezane za vremenske prilike: suvo vreme, vlažan kolovoz, snežni uslovi, snežni uslovi sa ledom. Za statističku obradu prikupljenih podataka i formiranje modela korišćena je ANOVA metoda. U priručniku HCM iz 2000. godine prikazani su rezultati modela iz aspekta uticaja analiziranih faktora na kapacitet (Tabela 3). Podrazumevano učešće teških teretnih vozila u saobraćajnom toku kretalo se od 10 do 15%.

Tabela 3 Kapacitet na Nemačkim autoputevima u različitim uslovima okruženja

Tip autoputa	Radni dan/Vikend	Dnevna vožnja, suv kolovoz	Noćna vožnja, suv kolovoz	Dnevna vožnja, vlažan kolovoz	Noćna vožnja, vlažan kolovoz
Šestotračni autoput	Radni dan	1489	1299	1310	923
	promena u %		13	12	38
Šestotračni autoput	Vikend dani	1380	1084	1014	-
	promena u %		21	27	-
Četvorotračni autoput	Radni dan	1739	1415	1421	913
	promena u %		19	18	47
Četvorotračni autoput	Vikend dani	1551	1158	1104	-
	promena u %		25	29	-

Vrednost kapaciteta je izražena u vozilima/čas/po saobraćajnoj traci

U tabeli su prikazani rezultati istraživanja na nivou jednog sata. Može se uočiti da se kapacitet saobraćajne trake smanjuje tokom radnog dana usled vlažnog kolovoza između 12 i 18%. U uslovima noćne vožnje, redukcija kapaciteta je veća i kreće se od 13 do 19%. Tokom zimskih meseci se saobraćajni vršni časovi praktično realizuju pre svitanja i nakon zalaska sunca, pa je posebno važno raspolagati ovim informacijama. Takođe se mogu uočiti manje vrednosti operativnog kapaciteta radnim danom u odnosu na vikend. Procenat smanjenja kapaciteta pod uticajem vremenskih prilika je veći tokom vikenda u odnosu na radni dan i kreće se od 27 do 29% za vožnju po vlažnom kolovozu u dnevnim uslovima, što se može obrazložiti razlikom u karakteristikama kretanja koja se obavljaju vikendom i radnim danom.

U studiji Univerziteta u Virdžiniji istraživao je uticaj kiše različitog intenziteta na kapacitet autoputske deonice i na eksploatacionu brzinu (Smith, Byrne, Copperman, Hennessy, & Goodall, 2004). Istraživanje je bazirano na činjenici da

upravljači putevima moraju težiti novim tehnikama i inteligentnim transportnim sistemima uzimajući u obzir postojeće baze podataka o vremenskim uslovima, njihovu analizu i prognozu. Istraživanje je realizovano na Hempton autoputu. Podaci o vremenskim prilikama i parametrima saobraćajnog toka prikupljeni su u periodu od jedne godine na dve autoputske deonice. Podaci o saobraćajnim pokazateljima prikupljeni su na dvominutnim, ali su za potrebe analize agregirani na petnaestominutne intervale. Časovni podaci o vremenskim prilikama su prikupljeni sa meteorološke stanice koja se nalazila na oko 4.8 km od lokacije istraživanja. Kategorizacija kiše je prikazana u tabeli 4.

Tabela 4 Kategorizacija kiše po intenzitetu

Kategorija	Intenzitet kiše
Bez kiše	0-0.01 inch/h (0-0.25mm/h)
Kiša slabog intenziteta	0.01-0.25 inch/h (0.25-6.35mm/h)
Kiša jakog intenziteta	>0.25 inch/h (>6.35mm/h)

Iz kategorizacije se vidi da padavine manje od 0.25mm/h nisu uzimane u razmatranje. Dobijena redukcija kapaciteta je prikazana uz poređenje sa prethodnim istraživanjima (Tabela 5).

Tabela 5 Uporedni prikaz redukcije kapaciteta kroz istraživanja

Autor istraživanja	Ibrahim i Hal	Brilon i Ponzlet	Smit
Lokacija	Toronto, Ontario	Nemačka	Virdžinija
Godina	1994.	1995.	2004.
Kiša slabog intenziteta	-	12-47%	4-10%
Kiša jakog intenziteta	14-15%	12-47%	25-30%

Iz tabele se vidi da je za razliku od istraživanja iz 1994. godine i za kišu slabog intenziteta identifikovan uticaj na kapacitet. U odnosu na istraživanje iz 1995. godine, zabeležen je nešto slabiji uticaj kiše slabog intenziteta na kapacitet deonice, dok je u odnosu na istraživanje iz 1994. godine dobijen veći uticaj kiše jakog intenziteta.

Chung i ostali (2006) su u svom radu predstavili rezultate istraživanja uticaja vremenskih prilika na kapacitet pet autoputskih deonica jednog od najznačajnijih putnih pravaca u Tokiju (Chung et al., 2006). Podaci o saobraćaju su prikupljeni sa ultrasoničnih detektora (na rastojanjima od 300m) na nivou jednominutnih intervala u periodu od preko dve godine, ali su za potrebe analize agregirani na petominutne intervale. Za snimanje vremenskih prilika korišćen je precizan

radarski sistem „Tokio Amesh“, sa mogućnošću posmatranja meteoroloških karakteristika područja u radijusu od 50km. Podaci o kiši su takođe beleženi na nivou jednog minuta, a agregirani su na petominutne intervale. U tabeli je prikazana kategorizacija analiziranih intenziteta kiše (Tabela 6)

Tabela 6 Kategorizacija intenziteta kiše

Intenzitet kiše						
Bez padavina	1mm/h	2mm/h	3mm/h	5-10 mm/h	10-20 mm/h	>20 mm/h

Na osnovu rezultata istraživanja zabeležen je maksimalan uticaj kiše na kapacitet od 17%, dok se smanjenje kapaciteta pod uticajem slabe kiše od 1mm/h kretalo u granicama od 4 do 7%. U tabeli 7 su prikazane vrednosti promene kapaciteta pod uticajem kiše na pet analiziranih lokacija.

Tabela 7 Zabeležena redukcija kapaciteta na pet analiziranih lokacija

Intenzitet kiše (mm/h)	Kapacitet (voz/h)					Smanjenje kapaciteta (%)
	Lokacija 1	Lokacija 2	Lokacija 3	Lokacija 4	Lokacija 5	
0	1674	1902	2064	1888	2022	-
1	1584	1826	1933	1812	1878	4 - 7
2	1560	1770	1892	1824	1842	4 - 9
3	1572	1770	1880	1804	1854	4 - 9
4	1572	1764	1860	1800	1844	5 - 10
6	1542	1745	1846	1751	1809	7 - 10
5-10	1524	1722	1818	1733	1784	8 - 11
10-20	1536	1666	1764	1717	1749	8 - 14
>20	1475	1788	1706	1791	1719	5 - 17

Pored ispitivanja efekata uticaja kiše ispitivan je i uticaj dnevne svetlosti na kapacitet koji je meren u vršnim periodima tokom letnjih i zimskih meseci. Prikupljeni su podaci o kapacitetu u jutarnjem vršnom času u periodima pre i nakon izlaska sunca. Rezultati su pokazali da je kapacitet za 12.8% veći u dnevnim uslovima. Interesantno je, da je dobijeni efekat intenzivniji od ispitivanog uticaja pojedinih kategorija kiše na kapacitet. Pošto je pomenuto istraživanje sprovedeno samo na jednoj lokaciji, dobijeni rezultat nije iskorišćen za opšte zaključivanje, ali je pokazano da postoji uticaj dnevne svetlosti na kapacitet.

Značaj ispitivanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćaj može se uočiti analizom nivoa detaljnosti tretiranja ove problematike kroz izdanja inženjerskog priručnika HCM. Naime, u načinu i obimu analize uticaja nepovoljnih vremenskih prilika postoje velike razlike, analizirajući izdanja od 1965. godine do

poslednjeg izdanja iz 2010. godine. U okviru ove disertacije biće napravljeno poređenje u kontekstu uticaja vremenskih prilika na kapacitet između priručnika HCM iz 2000. (Highway capacity manual, 2000) i HCM iz 2010. godine (Highway capacity manual, 2010).

U okviru priručnika iz 2000. godine, u delu koji se bavi analizom uticaja vremenskih prilika na kapacitet, referisani su rezultati dva prethodno opisana rada, Ibrahim i Hall (1994) i Brilon i Ponzlet (1996). S obzirom da je reč o istraživanjima koja su rađena u Nemačkoj i Kanadi, smatrano je da apsolutno usvajanje dobijenih rezultata koji bi važili i za mrežu puteva u SAD, ne oslikava realnu situaciju (Agarwal et al., 2005). Kao osnovni argumenti navode se drugačije vrednosti kapaciteta po saobraćajnim trakama na višetraknim autoputevima i razlike u ponašanju vozača. Sa druge strane, u pomenutim istraživanjima, padavine nisu izražene po intenzitetima, što ne omogućava centru za upravljanje saobraćajem da u odnosu na intenzitete padavina, primeni odgovarajuće strategije za optimizaciju kapaciteta i eksploatacione brzine koristeći inteligentne transportne sisteme (ITS). Kao rezultat ovih različitosti i uočenih nedostataka, realizovana su četvorogodišnja istraživanja u Minesoti (Agarwal et al., 2005). Deo rezultata iz ove studije je referisan u okviru verzije priručnika HCM iz 2010. godine. Istraživanja su sprovedena na segmentu autoputa između Minapolisa i Sent Pola koji je opremljen sa oko 4000 detektora. Podaci o karakteristikama saobraćajnog toka prikupljeni su na tri lokacije, sa kojih su informacije osvežavane na nivou 30 sekundi. Meteorološki podaci prikupljeni su sa pet meteoroloških stanica lociranih u blizini autoputa. Rezultati ocena uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet prikazani su u tabeli 8.

Tabela 8 Procenat smanjenja kapaciteta usled različitih vremenskih prilika (Agarwal et al., 2005)

Vremenske prilike	Opseg	Kapacitet (voz/h/saob. traci) (%)		
		Lokacija1 (MSP)	Lokacija 2 (MIC)	Lokacija 3 (STP)
Kiša	0	2353 (0)	2356	2245 (0)
	0 - 0.25 mm/h	2319 (-1.44)	2329 (-1.17)	2168 (-3.43)
	0.25 - 6.35mm/h	2219 (-5.67)	2217 (-5.94)	2019 (-10.10)
	>6.35 mm/h	2100 (-10.72)	2026 (-14.01)	1849 (-17.69)
Sneg	0	2353 (0)	2356 (0)	2245 (0)
	<=1.27 mm/h	2264 (-3.93)	2227 (-5.51)	2168 (-3.44)
	1.5 - 2.5 mm/h	2145 (-8.98)	2085 (-11.53)	2122 (-5.48)
	2.5 - 12.7 mm/h	2181 (-7.45)	2066 (-12.33)	1946 (-13.35)
	>12.7 mm/h	1896 (-19.53)	1887 (-19.94)	1621 (-27.82)
Temperatura	> 10° C	2333 (0)	2253 (0)	-
	10°-1° C	2308 (-1.08)	2229 (-1.06)	-
	0°- (-20°) C	2299 (-1.48)	2219 (-1.52)	-
	< - 20° C	2094 (-10.27)	2104 (-6.62)	-
Brzina vetra	< 16km/h	2354 (0)	2313 (0)	-
	16 - 32 km/h	2337 (-0.73)	2280 (-1.41)	-
	> 32 km/h	2337 (-0.74)	2262 (-2.19)	-
Vidljivost	> 1.6 km	-	2342 (0)	-
	1.6 - 0.8 km	-	2115 (-9.67)	-
	0.8 - 0.4 km	-	2069 (-11.67)	-
	< 0.4 km	-	2069 (-10.49)	-

Rezultati su pokazali značajno smanjenje vrednosti kapaciteta pod uticajem kiše. U odnosu na definisane intenzitete kiše, smanjenja su se kretala u opsezima od 1 do 3%, od 5 do 10%, i od 10 do 17%. Za razliku od istraživanja sprovedenih u Virdžiniji (Smith et al., 2004) gde je zabeleženo da kiša jakog intenziteta utiče na smanjenje kapaciteta od 25 do 30%, u ovoj studiji su dobijene značajno manje vrednosti, odnosno od 10 do 17%. Identifikovano smanjenje kapaciteta pod uticajem snežnih padavina u zavisnosti od definisanih intenziteta snega kreće se od 3 do 5%, od 5 do 12%, od 7 do 13% i od 19 do 28%. Kada je reč o uticaju brzine vetra i temperature na smanjenje kapaciteta nisu dobijeni značajni efekti uticaja. Analiza uticaja vidljivosti ispitivana je samo na jednoj lokaciji i dobijeno je da se u zavisnosti od nivoa vidljivosti, smanjenje kapaciteta kreće od 10 do 12%, u odnosu na idealne vremenske uslove. Takođe, utvrđeno je da svaki nivo vidljivosti ispod 1.6 km ima približno jednak uticaj na kapacitet. Razlike uticaja vremenskih prilika na kapacitet, dobijenih navedenim istraživanjem i efekata uticaja definisanih verzijom priručnika HCM iz 2000. godine, predstavljene su u tabeli 9.

Tabela 9 Uticaj vremenskih prilika na smanjenja kapaciteta HCM2000/studija (Agarwal et al., 2005)

Vremenske prilike	Opseg	Kapaciteti (procentualna smanjenja)	
		HCM (2000)	Predmetna studija
Kiša	0 - 0.25 mm/h	0	1-3
	0.25 - 6.35 mm/h	0	5-10
	>6.35 mm/h	14-15	10-17
Sneg	<=1.27 mm/h	5-10	3-5
	1.27 - 2.5 mm/h	5-10	5-12
	2.5 - 12.7 mm/h	5-10	7-13
	>12.7 mm/h	25-30	19-28
Temperatura	10°-1° C	N/A	1
	0°-(-20°) C	N/A	1.5
	<-20° C	N/A	6-10
Brzina vetra	16-32 km/h	N/A	1-1.5
	>32 km/h	N/A	1-2
Vidljivost	1.6 - 0.8 km	N/A	9
	0.8 - 0.4 km	N/A	11
	< 0.4 km	N/A	10.5

*N/A – nije analiziran

U poređenju sa rezultatima priručnika HCM iz 2000. godine, mogu se uočiti sledeće osnovne razlike:

- Istraživanja su pokazala da kiša slabog intenziteta ima značajno veći uticaj na kapacitet (od 5 do 10%), za razliku od rezultata priručnika HCM iz 2000. godine gde uticaj kiše slabog intenziteta nije identifikovan;
- Uticaj snega jakog intenziteta na smanjenje kapaciteta od 19 do 28% se donekle poklapa sa rezultatima priručnika iz 2000. godine;
- Niska temperatura, ispod 20°C, utiče na redukciju u kapacitetu od 6 do 10%
- Smanjena vidljivost (npr. magla) prouzrokuje smanjenje kapaciteta od 10 do 12%

U izveštaju iz 2006. godine prikazani su rezultati istraživanja uticaja padavina na parametre saobraćajnog toka na prostoru tri različite regije, obuhvatajući gradove Minneapolis, Baltimor i Sijetl (Hranac et al., 2006) Jedan od ciljeva istraživanja bio je vezan za ispitivanja razlike uticaja identičnih nepovoljnih vremenskih prilika, u odnosu na područje istraživanja. Pored uticaja kiše i snega na parametre saobraćajnog toka, velika pažnja je posvećena nivou vidljivosti u analiziranim vremenskim prilikama. Uslovi pod kojima su snimane promene u vrednostima saobraćajnog toka predstavljeni su u tabeli 10.

Tabela 10 Analizirani tipovi uticaja nepovoljnih vremenskih prilika

Intenzitet padavina	Vidljivost (km)			
	<0.8	0.8 - 1.6	1.6 - 4.8	>4.8
Bez padavina	√	√	√	Idealni uslovi
Sneg <1.27 mm/h	√	√	√	√
Sneg 1.27 - 2.5 mm/h	√	√	√	√
Sneg >2.5 mm/h	√	√	√	√
Kiša 0 - 0.25 mm/h	√	√	√	√
Kiša 0.25 - 6.35 mm/h	√	√	√	√
Kiša >6.35 mm/h	√	√	√	√

Podaci o saobraćaju su prikupljeni sa detektorskih petlji, dok su meteorološki podaci prikupljeni sa meteoroloških stanica na aerodromima, koji su se nalazili u uticajnoj zoni istraživanja. Dobijeno je da se smanjenje kapaciteta pod uticajem kiše kreće od 10 do 11% bez obzira na intenzitet. Za uticaj snežnih padavina zabeležena smanjenja kapaciteta su se kretala od 12 do 20%, ali je analiza takođe pokazala da ne postoji funkcionalna zavisnosti između intenziteta snežnih padavina i promena u kapacitetu.

Kao jedan od rezultata istraživanja kreiran je faktor uticaja vremenskih prilika na osnovne parametra saobraćajnog toka. Faktor uticaja vremenskih prilika (WAF) zavisi od vrste padavina (sneg ili kiša), intenziteta padavina i stepena vidljivosti, i predstavlja odnos vrednosti parametara saobraćajnog toka u uslovima nepovoljnih vremenskih prilika i u normalnim uslovima.

$$WAF = c_1 + c_2i + c_3i^2 + c_4v + c_5v^2 + c_6iv$$

i – intenzitet padavina (cm/h)

v – vidljivost (km)

iv – interakcija između vidljivosti i intenziteta padavina

$c_1...c_6$ – koeficijenti za kalibraciju modela

U Belgiji je 2010. godine sprovedeno istraživanje uticaja vremenskih prilika na promenu intenziteta protoka saobraćaja (Cools et al., 2010). Osnovni cilj je bio ispitati da li vremenske prilike podjednako utiču na promenu intenziteta saobraćaja (bez obzira na lokaciju istraživanja) i da li je na osnovu identifikovanih promena na pojedinim deonicama moguće kvantifikovati uticaj vremenskih prilika. Autori su imali za cilj da ispituju da li se rezultati prethodnih istraživanja i studija iz ove oblasti mogu primeniti i za područje Belgije. Istraživanje je realizovano na tri vangradske deonice. Podaci o karakteristikama saobraćajnog toka su se prikupljali

automatskim brojačima saobraćaja, dok su meteorološki podaci dobijeni sa automatskih meteoroloških stanica Kraljevskog Meteorološkog Instituta u Belgiji. Rezultati studije su pokazali da padavine, oblačno vreme i vetar utiču na smanjenje protoka saobraćaja. Kao najvažniji zaključak autori navode da se smanjenje protoka saobraćaja usled nepovoljnih vremenskih prilika, snimljeno na jednoj lokaciji, ne može generalizovati za čitavu saobraćajnu mrežu. Autori, takođe ističu važnost uključivanja faktora uticaja vremenskih prilika u upravljanju bezbednošću saobraćaja kao i relevantnost istraživanja uticaja vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka na lokalnom nivou.

U skladu sa zaključcima iz prethodno navedenog rada, slična istraživanja su realizovana u Maleziji (Alhassan & Ben-Edigbe, 2011). Saobraćajni podaci su pneumatskim detektorom prikupljeni na deonice autoputa J5 u Maleziji u periodu od tri meseca. Meteorološka stanica je bila locirana na 1750m od lokacije istraživanja. Istraživanja su realizovana tokom radnih i neradnih dana. U zavisnosti od intenziteta kiše za radni dan utvrđeno je da za kišu slabog, srednjeg i kišu jakog intenziteta, smanjenja kapaciteta iznose 4.4%, 9.77% i 45.9% respektivno. Za vreme vikenda utvrđeno je da kiša slabog intenziteta dovodi do smanjenja kapaciteta od 0.2%, kiša srednjeg intenziteta od 13.9% i kiša jakog intenziteta od 16.7%.

Kvon je 2013. godine sproveo istraživanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka na deonici autoputa u Torontu (Kwon, Fu, & Jiang, 2013). Karakteristično za analiziranu deonicu je da tokom dana na deonici u oba vršna perioda, jutarnjem i popodnevnom, dolazi do zagušenja. Podaci o saobraćaju prikupljeni su na petominutnim intervalima tokom tri zimska perioda uz pomoć sistema za upravljanje saobraćajem (RESCU) koji konstantno vrši monitoring čitavom dužinom autoputa. Podaci o karakteristikama vremenskih prilika prikupljeni su sa meteorološke stanice koja je bila udaljena oko 5 km od lokacije istraživanja. Stanje kolovoza je ocenjivano vizuelnom percepcijom i u pogledu prirode pojave (sneg, bljuzgavica, led, itd.) i u pogledu intenziteta (delimično pokriven, potpuno pokriven). Na osnovu toga, formiran je indeks stanja kolovoza (RSI – road surface index) koji je uzimao vrednost iz opsega od 0 do 1. Ovaj

parametar je veoma sličan koeficijentu prijanjanja. Akcenat analize stavljen je na snežne padavine. Na osnovu statističke obrade prikupljenih podataka, formiran je multiregresioni model koji opisuje promenu kapaciteta u odnosu na stepen vidljivosti i intenzitet snega. Za sve analizirane faktore uticaja, osim za vidljivost, utvrđen je linearni oblik zavisnosti u odnosu na promenu kapaciteta i slobodne brzine. Za vidljivost je dobijeno da logaritam vrednosti na najbolji način opisuje uticaj na kapacitet i slobodnu brzinu. U narednoj tabeli prikazani su elementi formiranog modela (Tabela 11).

Tabela 11 Model redukcije kapaciteta u odnosu na intenzitet snega i vidljivost

	Koeficijenti	Standardna greška	t	Značajnost	95% interval poverenja	
					Donja granica	Gornja granica
Model 1: Kalibrisan u odnosu na sve promenljive (R ² =91%)						
Konstanta	814.27	62.25	13.08	7.46E-12	685.17	943.36
RSI	463.41	71.71	6.46	1.68E-06	314.69	612.14
ln (vidljivost)	226.51	24.69	9.17	5.67E-09	175.3	277.72
Model 2: Kalibrisan u odnosu na sve promenljive osim vidljivosti (R ² =76%)						
Konstanta	1,222.89	103.71	11.79	5.57E-11	1,007.8	1,437.98
Sneg (mm/h)	-31.97	7.37	-4.34	2.66E-04	-47.26	-16.68
RSI	619.06	108.52	5.7	9.75E-06	394	844.12

Sa opadanjem nivoa vidljivosti opada i kapacitet saobraćajnice po logaritamskoj funkciji. Iz modela se može videti da RSI ima značajan efekat na kapacitet. S obzirom da je koeficijent pozitivan može se zaključiti da veća vrednost RSI utiče na povećanje kapaciteta. Na primer, za intenzitet snega od 5mm/h i vrednost RSI=0.2 (kolovoz prekriven snegom) kapacitet se redukuje za 44.24%, dok se za vrednost RSI=0.8 (vlažan ali čist kolovoz) kapacitet redukuje za 24.08%. Takođe i intenzitet snega ima značajan efekat na redukovanje kapaciteta. Na primer, za intenzitet snega od 2 mm/h kapacitet se redukuje za 3.5%, dok redukcija kapaciteta za intenzitet snega od 15 mm/h iznosi 26%. U poređenju sa rezultatima iz priručnika HCM iz 2010. godine model daje bolje rezultate opisa zavisnosti između intenziteta snega i smanjenja kapaciteta. Kao kritika navodi se da u priručniku iz 2010. godine za promenu intenziteta snega sa 12.7 na 12.95 mm/h, redukcija kapaciteta ide sa 11.04% na 22.43%, što je veoma veliki skok za porast intenziteta snega od 2%. Predloženi model, odnos između intenziteta snega i redukcije kapaciteta, opisuje linearnim trendom promene.

U Holandiji su zagušenja na autoputevima procenjena kao ozbiljna ekonomska šteta u vidu izgubljenih časova. Navodi se da je u periodu od maja 2010. do aprila 2011. u zagušenjima izgubljeno oko 68 miliona vozilo časova (Van Stralen, Calvert, & Molin, 2015). Ako se analizira uticaj vremenskih prilika na zagušenje, mogu se definisati dva osnovna vida uticaja. Kada je u pitanju ponuda transportnog sistema, na osnovu velikog broja istraživanja, utvrđeno je da vremenski uslovi utiču na smanjenje kapaciteta, kroz smanjenje brzine i većih intervala sleđenja. Sa druge strane, vremenske prilike utiču i na varijacije i promenu karakteristika transportnih zahteva. Istraživanje, opisano u pomenutom radu, sprovedeno je na 11 deonica autoputske mreže u Holandiji i trajalo je od 2007. do 2009. godine. Podaci o saobraćajnom protoku i brzini vozila su beleženi na jednominutnim intervalima, pomoću sistema za monitoring Holandskih autoputeva (MONICA). Meteorološki podaci su dobijani od Holandskog meteorološkog instituta. Uticaj kiše je analiziran kroz dve kategorije, kišu slabog intenziteta <1 mm/h i kišu jakog intenziteta >1 mm/h. Važno je napomenuti da u uzorku snimanja nije pokriven period sa snežnim danima. Na osnovu dobijenih rezultata, prosečno smanjenje kapaciteta pod uticajem kiše slabog intenziteta iznosilo je 5.7%. U odnosu na lokacije istraživanja smanjenje kapaciteta je variralo između 3.9 i 8.9%. Prosečno smanjenje kapaciteta pod uticajem kiše jakog intenziteta iznosilo je 8.1%. Iako postoji statistički značajna razlika, procentualna razlika je mala imajući u vidu kategorizaciju intenziteta kiše. Kroz istraživanja dobijeno je da su vrednosti smanjenja kapaciteta prilično konstantne na nivou pojedinačne lokacije i za uticaj kiše istog intenziteta. Međutim, posmatrajući sve lokacije, razlike u uticaju su varirale između -3.7 i 11.1%. Autori ove razlike objašnjavaju različitim tehničkim karakteristikama istraživanih lokacija i različitim kvalitetom kolovoza. Varijacije u transportnim potrebama u odnosu na uticaj vremenskih prilika u ovom pregledu nisu detaljno predstavljene. U odnosu na dobijene rezultate uticaja vremenskih prilika na transportnu ponudu i potražnju, verovatnoća pojave zagušenja na kritičnim lokacijama (usko grlo) sa 50% pod uticajem kiše lakog intenziteta raste na 86.7%, dok u uslovima kiše jakog intenziteta raste na 77.4%. Veća verovatnoća pojave zagušenja pod uticajem kiše slabog intenziteta obrazložena je kao posledica

povećanja transportnih zahteva, odnosno vidovne preraspodele kretanja (relacija: bicikl - putnički automobil).

Yuhan i ostali (2015) su ispitivali uticaj padavina na gradskim saobraćajnicama koje povezuju nekoliko magistralnih prstenova formiranih u gradu Pekingu (Jia, Du, & Wu, 2015). Istraživanje je realizovano na tri deonice sa tri trake po smeru, ograničenjem brzine od 80 km/h i PGDS-om od oko 100,000 vozila u oba smera. Ideja istraživanja je bila da se na osnovu kvantifikacije uticaja kiše generalizuju zaključci i da se formira model zavisnosti osnovnih parametara saobraćajnog toka, koji bi taj uticaj uzimao u obzir. Podaci o protoku saobraćaja, srednjoj brzini i gustini saobraćaja su pomoću detektora prikupljeni na dvominutnim intervalima, ali su za potrebe istraživanja agregirani na desetominutne intervale. Podaci o intenzitetu kiše su prikupljeni iz Nacionalnog meteorološkog centra. Kategorizacija intenziteta kiše je predstavljena u tabeli 12.

Tabela 12 Kategorije kiše (Jia et al., 2015)

Kategorija	Intenzitet kiše (mm/h)
Bez kiše	0
Kiša slabog intenziteta	<2,5
Kiša srednjeg intenziteta	2,5 - 7,6
Kiša jakog intenziteta	>7,6

Vrednost kapaciteta je ocenjivana kao prosečna vrednost najvećih petoprocentnih vrednosti protoka saobraćaja. Na osnovu rezultata dobijeno je da kiša ima uticaj na smanjenje vrednosti kapaciteta. U zavisnosti od toga da li je u pitanju kiša slabog, srednjeg ili jakog intenziteta, vrednost kapaciteta se smanjuje od 5 do 10%, 13 do 21% i od 17 do 25%, respektivno. Autori, kao razlog male razlike u uticaju između kiše srednjeg i kiše jakog intenziteta navode mali uzorak u istraživanjima pod kišom jakog intenziteta. U odnosu na zabeležene rezultate uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, izvršena je modifikacija Greenshield-ovog modela. Predloženi model zavisnosti protoka saobraćaja i brzine uzima u obzir uticaj kiše.

$$q = u \cdot 275 \cdot \left[1 - \frac{(u - 5)^{\frac{1}{1.16}}}{(-0.54r^{1.04} + 76.78 - 5)} \right]$$

q – protok saobraćaja (voz/h)

u – brzina (km/h)

r – intenzitet kiše (mm/h)

Validacija predloženog modela je izvršena testiranjem nove baze podataka. Zabeležene su veoma visoke vrednosti koeficijenta determinacije od preko 0.75 i za suvo vreme i za kišu, što ide u prilog kvalitetu modela. Autori napominju da je bolji rezultat ostvaren testiranjem modela za suvo vreme, a kao meru unapređenja navode formiranje kvalitetnije baze podataka za uticaj kiše.

Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu saobraćajnog toka

Istraživanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na promenu vrednosti brzine je u velikom broju navedenih radova u prethodnom poglavlju realizovano paralelno sa analizom uticaja na kapacitet. Pored rezultata tih istraživanja, u okviru ovog poglavlja biće predstavljen i pregled istraživanja koja su isključivo orjentisana na analizu uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu.

FHWA (Federal Highway Administration) izveštaj iz 1977. godine, između ostalog, bavi se ocenom ekonomskog uticaja nepovoljnih vremenskih prilika analizirajući sve kategorije autoputeva (McBride et al., 1977). Analiza uticaja se jednom delom odnosila na promene u potrošnji goriva i učestalost kašnjenja na posao. Kao jedan od osnovnih argumenata kojim bi mogle da se obrazlože dve pomenute pojave, realizovana su istraživanja uticaja sedam različitih vremenskih uslova na promenu vrednosti brzine (Tabela 13).

Tabela 13 Procenat smanjenja brzine u odnosu na tip vremenskih prilika

Tip vremenskih prilika	Smanjenje brzine (%)
Suv kolovoz	0
Vlažan kolovoz	0
Vlažan kolovoz i snežne padavine	13
Vlažan kolovoz i bljuzgavica	22
Bljuzgavica sa formiranim kolotrazima	30
Snežno vreme i kolovoz lepljiv od snega	35
Snežno vreme i kolovoz nabijen snegom	42

Iz tabele se vidi da zabeleženi procenat smanjenja brzine raste sa kategorijom analiziranih nepovoljnih vremenskih prilika. Na zvaničnom sajtu www.fhwa.dot.gov, aktuelni podaci uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na prosečnu brzinu kretanja i brzinu slobodnog toka, s obzirom da predstavljaju sumarne rezultate više studija, predstavljeni su u širokim opsezima (Tabela 14).

Tabela 14 Procenat smanjenja prosečne brzine i brzine slobodnog toka (www.fhwa.dot.gov)

Tip vremenskih prilika	Smanjenje prosečne brzine (%)	Smanjenje brzine slobodnog toka (%)
Kiša/sneg slabog intenziteta	3 - 13	2 - 13
Kiša jakog intenziteta	3 - 16	6 - 17
Sneg jakog intenziteta	5 - 40	5 - 64
Loša vidljivost	10 - 12	-

Hawkins (1988) je istraživao uticaj vremenskih prilika na brzinu saobraćajnog toka na deonici autoputa M1 u Velikoj Britaniji (Hawkins, 1988). Vremenske prilike je klasifikovao u devet kategorija, a pored padavina, uzeo je u obzir i uticaj nivoa vidljivosti. Smanjenje brzine je zabeleženo pri vidljivosti manjoj od 300m. Za nivo vidljivosti od 100m u svim saobraćajnim trakama je zabeležena redukcija brzine od 25 do 30%. Uticaj kiše doveo je do smanjenja brzine za 4km/h u spoj i centralnoj saobraćajnoj traci, dok je zabeleženo smanjenje u brzini traci iznosilo oko 6km/h. Rezultati istraživanja su pokazali da intenzitet kiše ne utiče na nivo redukcije brzine kretanja vozila. Veći uticaj na smanjenje brzine zabeležen je u snežnim uslovima i po bljuzgavici i kretao se od 30 do 40 km/h.

Ibrahim i Hall (1994) su, pored rezultata vezanih za uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na maksimalnu vrednost protoka, istraživali i uticaj na brzinu (Ibrahim & Hall, 1994). Na osnovu metodologije, koja je predstavljena u prethodnom poglavlju utvrđeno smanjenje brzine pri uticaju kiše slabog intenziteta kretalo se oko 2 km/h. Kiša jakog intenziteta prozrokovala je intenzivniji uticaj na smanjenje brzine slobodnog toka od 5 do 10 km/h. Rezultati su pokazali da sneg slabog intenziteta utiče na smanjenje brzine slobodnog toka oko 3 km/h, što je negde između kiše slabog intenziteta i kiše jakog intenziteta. Za sneg jakog intenziteta identifikovano je smanjenje brzine od 38 do 50 km/h.

U okviru projekta ispitivanja uticaja sistema za upozorenje od magle na ponašanje vozača, finansiranog od strane Holandskog ministarstva za saobraćaj, iskorišćeni

su podaci i izvršena je analiza uticaja kiše na obim saobraćaja i na ponašanje vozača (Hogema, 1996). Dobijeni rezultati su pokazali da kiša nije u velikoj meri uticala na promenu obima dnevnog saobraćaja, ali je uticala na promenu vrednosti parametara saobraćajnog toka kao što su brzina kretanja i intervali sleđenja. Brzina kretanja je smanjena u vremenskim uslovima sa padavinama. Smanjenje srednje vrednosti brzine kretanja iznosilo je 11 km/h. Rezultati su pokazali da je procenat intervala sleđenja manjih od 1 sekunde manji u kišnim uslovima (5%) u odnosu na vremenske uslove bez padavina (10.8%). Slični rezultati su dobijeni, sa manje izraženim razlikama, kod intervala sleđenja manjih od 3 sekunde. Sa 46.4% učešća ove kategorije intervala sleđenja u danima bez padavina, procenat učešća se smanjio na 44.8% u kišnim danima. Za veće vrednosti intervala sleđenja nisu uočene razlike. U radu nisu predstavljeni konkretni zaključci vezani za uticaj kiše na kapacitet.

U Polk Kauntiju (Ajova) istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka realizovana su na mostu (Knapp & Smithson, 2001). Most je izabran sa ciljem minimizacije ostalih uticaja koji bi mogli da umanje preciznost kvantifikacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, kao što je na primer uticaj ukrštanja sa drugim saobraćajnicama. U istraživanjima je korišćen poseban mobilni "Auto Scope" sistem za prikupljanje podataka o saobraćaju putem video kamera. Prikupljeno je više od 27 časova snimaka tokom zimskog perioda 1998./1999. godine. Podaci o vidljivosti i visini snežnog pokrivača prikupljeni su manuelno. Na svakih petnaest minuta, na osnovu postavljenih markera utvrđivan je nivo vidljivosti. Visina snežnog pokrivača na kolovozu ocenjivana je sa video zapisa. Prosečna zabeležena brzina u zimskim uslovima je iznosila 96.4 km/h, što je za oko 16% manje u odnosu na vrednost brzine u suvom vremenu. Standardna devijacija u zabeleženim vrednostima brzina, tokom perioda istraživanja, iznosila je 12.2 km/h, dok se vrednost standardne devijacije u dobrim vremenskim uslovima kretala oko 2.99 km/h. Multiregresiona analiza pokazala je dobru korelaciju između prosečne vrednosti brzine u vanvršnom periodu, kvadratne vrednosti protoka saobraćaja, stepena vidljivosti (veće ili manje od 0.4 km) i stanja kolovoza (postoji snežni pokrivač ili ne postoji). Multiregresioni model koji je

formiran na osnovu dobijenih rezultata predviđa da se za nivo vidljivosti ispod 0.4 km vrednost brzine u vanvršnom periodu tokom zime smanjuje za 6.3 km/h, dok se u slučaju kolovoza prekrivenog snegom brzina smanjuje za 11.7 km/h.

U Ajdahu je 1993. godine započet projekat vezan za upozorenje vozača na nepovoljne vremenske prilike (Idaho Storm Warning Project). Svrha projekta je bila ispitivanje opravdanosti implementacije senzorske opreme za identifikaciju vremenskih prilika i nivoa vidljivosti kao dela ITS-a u cilju pravovremenog informisanja vozača. Ideja je inicirana nakon značajnog broja saobraćajnih nezgoda koji se dogodio u uslovima nepovoljnih vremenskih prilika u periodu od 1988. do 1993. godine na deonici međudržavnog puta I-84. Senzori za identifikaciju brzine vetra, temperature, nivoa vidljivosti, vrste i intenziteta padavina bili su postavljeni duž istraživane deonice. Podaci o saobraćaju su prikupljeni sa automatskih brojača. Kyte i ostali (2001) su na osnovu prikupljenih podataka iz pomenutog projekta pokušali da formiraju model koji bi opisao korelaciju između brzine kretanja putničkog automobila i karakteristika nepovoljnih vremenskih prilika (Kyte et al., 2001). Na nivou srednjih vrednosti, smanjenje brzine u nepovoljnim vremenskim prilikama kretalo se oko 13 km/h, odnosno 11%. U okviru istraživanja uspostavljen je veliki broj korelacija između promene brzine i varijacija ostalih analiziranih karakteristika vremenskih prilika, o čemu se detaljnije može pročitati u navedenom radu. Uglavnom, utvrđene korelacije su omogućile formiranje multiregresionog modela:

$$\text{Brzina (km/h)} = 100.2 - 16.4 \times \text{sneg na kolovozu} - 9.5 \times \text{vlažnost kolovoza} + 7.7 \times \text{stepen vidljivosti} - 11.7 \times \text{brzina vetra}$$

Isti autori su u veoma sličnom radu, koristeći se opisanom metodologijom i identičnom bazom podataka, formirali još tri multiregresiona modela, s tim što su dati modeli rezultat analize kompletne strukture saobraćajnog toka (Kyte et al., 2001). Utvrđeno je da se vrednost prosečne brzine u zavisnosti od intenziteta kiše smanjuje od 24 km/h (22%) do 27 km/h (25%) u odnosu na 109 km/h u idealnim uslovima. Za dobijanje ovih rezultata uz kišu bio je zaslužan i vetar intenziteta preko 32 km/h.

U slučaju kolovoza prekrivenog snegom ili ledom dobijena smanjenja brzine su se kretala od 21 km/h (19%) do 23 km/h (21%). Ovi rezultati su dobijeni u uslovima dobre vidljivosti, bez padavina i sa intenzitetom vetra manjim od 16 km/h. Kada je reč o vidljivosti, nije dobijen značajan rezultat po pitanju uticaju na brzinu. Utvrđeno je da tek nakon smanjenja nivoa vidljivosti ispod 0.16 km brzina приметно počinje da opada. Varijacije u karakteristikama vremenskih prilika omogućile su formiranje tri multiregresiona modela. Za razliku od prethodno prezentovanog modela u narednim modelima je figurisao i intenzitet padavina:

Model I: Brzina (km/h) = 115.82 – 0.34 x brzina vetra - 4.77 x intenzitet padavina – 4.54 x vlažnost kolovoza + 0.62 x stepen vidljivosti

Model II: Brzina (km/h) = 125 – 9.13 x brzina vetra - 8.96 x intenzitet padavina – 5.53 x vlažnost kolovoza + 0.87 x stepen vidljivosti

Model III: Brzina (km/h) = 126.53 – 9.03 x brzina vetra - 8.74 x intenzitet padavina – 5.43 x vlažnost kolovoza

Razlika u modelima je posledica različitih kombinacija vremenskih prilika i različitih kategorija intenziteta uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Autori navode i da su rezultati smanjenja brzine pod uticajem kiše jakog i slabog intenziteta i snega slabog intenziteta za 50% veći od vrednosti definisanih u priručniku HCM iz 2000. godine, dok je uticaj snega jakog intenziteta za 20% manji od vrednosti definisanih u priručniku.

U istraživanjima koja su realizovali Smit i ostali (2004), za razliku od identifikovanog značajnog uticaja definisanih kategorija kiše na kapacitet deonice autoputa, uticaj analiziranih kategorija na eksploatacionu brzinu nije dao tako značajne razlike (Smith et al., 2004). Rezultati uticaja kiše različitog intenziteta na smanjene prosečne brzine, na dve analizirane deonice autoputa, prikazani su u tabeli 15.

Tabela 15 Procenat smanjenja brzine pod uticajem kiše

Intenzitet kiše	Deonica 1			Deonica 2		
	Suvo vreme	Kiša slabog intenziteta	Kiša jakog intenziteta	Suvo vreme	Kiša slabog intenziteta	Kiša jakog intenziteta
	0	0.25-6.35mm/h	> 6.35mm/h	0	0.25-6.35mm/h	> 6.35mm/h
Prosečna brzina	58.77	55.18	55	59.97	57.08	56.72
Smanjenje (%)	0	6.11	6.41	0	4.82	5.43

Iako su rezultati pokazali da promena brzine nije zavisna od promene intenziteta kiše, uticaj kiše na vrednost brzine u odnosu na suvo vreme je evidentan. Na obe deonice autoputa koje su bile predmet istraživanja dobijeni su slični rezultati što je prikazano u prethodnoj tabeli.

Pored analize uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet segmenta autoputa između Minapolisa i Sent Pola analiziran je i uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila. Kako je već pomenuto, istraživanja su realizovana na tri lokacije (Agarwal et al., 2005). Rezultati redukovanja brzine pod analiziranim uticajem prikazani su u tabeli 16.

Tabela 16 Redukcija brzine pod uticajem definisanih nepovoljnih vremenskih prilika (Agarwal et al., 2005)

Vremenske prilike	Opseg	Prosečna eksploataciona brzina mph (procentualna promena)		
		Lokacija 1 MSP	Lokacija 2 MIC	Lokacija 3 STP
Kiša	0	65.63 (0)	69.28 (0)	63.61(0)
	0 - 0.25 mm/h	64.03 (-2.43)	67.84 (-1.17)	62.80(-1.27)
	0.25 - 6.35mm/h	62.58 (-4.64)	66.35(-4.23)	61.82(-2.81)
	>6.35 mm/h	61.13 (-6.85)	64.87(-6.37)	60.47(-4.94)
Sneg	0	65.63 (0)	69.28(0)	63.61(0)
	<=1.27 mm/h	63.13 (-3.8)	66.8(-3.58)	60.35(-5.14)
	1.5 - 2.5 mm/h	59.70 (-9.03)	63.35(-8.56)	59.15(-7.02)
	2.5 - 12.7 mm/h	60.00 (-8.56)	61.99(-10.52)	57.82(-9.11)
	>12.7 mm/h	58.27 (-11.20)	58.51(-15.56)	54.95(-13.62)
Temperatura	> 10° C	66.3 (0)	69.04(0)	-
	10°-1° C	65.63 (-1.00)	68.06(-1.42)	-
	0°- (-20°) C	65.14 (-1.75)	68.39(-0.94)	-
	< - 20° C	69.91 (-3.6)	68.62(-0.61)	-
Brzina vetra	< 16km/h	66.17 (0)	69.70(0)	-
	16 - 32 km/h	65.98 (-0.29)	69.15(-0.79)	-
	> 32 km/h	65.67 (-0.74)	68.65(-1.5)	-
Vidljivost	> 1.6 km	-	69.77(0)	-
	1.6 - 0.8 km	-	65.14(-6.62)	-
	0.8 - 0.4 km	-	64.82(-7.10)	-
	< 0.4 km	-	61.55(-11.78)	-

Smanjenje vrednosti brzine se procentualno kreće između 1 i 7% u zavisnosti od intenziteta kiše. Najveći uticaj na promenu brzine je zabeležen pod snegom jakog intenziteta, i kreće se od 11 do 16%. Analiza brzine vetra i temperature pokazala je

neznatan uticaj na brzinu. Ukoliko bilo koji od analiziranih vremenskih uslova ima indirektan uticaj i na nivo vidljivosti, treba imati u vidu da ovaj pokazatelj u značajnoj meri utiče na smanjenje vrednosti brzine. Za analiziranu skalu nivoa vidljivosti iz prethodne tabele vidi se da se procentualno izražena vrednost smanjenja brzine kreće od 6% do 12%.

U pomenutom radu su prikazane i uporedne vrednosti uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu u odnosu na podatke iz priručnika HCM iz 2000. godine (Tabela 17).

Tabela 17 Uticaj vremenskih prilika na smanjenja brzine HCM2000/studija (Agarwal et al., 2005)

Vremenske prilike	Opseg	Prosečna operativna brzina (procentualno smanjenje)	
		HCM (2000)	Studija
Kiša	0 - 0.25 mm/h	2-14	1-2.5
	0.25 - 6.35mm/h	2-14	2-5
	>6.35 mm/h	5-17	4-7
Sneg	<=1.27 mm/h	8-10	3-5
	1.27 - 2.5 mm/h	8-10	7-9
	2.5 - 12.7 mm/h	8-10	8-10
	>12.7 mm/h	30-40	11-15
Temperatura	10°-1° C	N/A*	1-1.5
	0°-(-20°) C	N/A	1-2
	<-20° C	N/A	0-3.6
Brzina vetra	16-32 km/h	N/A	1
	>32 km/h	N/A	1-1.5
Vidljivost	1.6 - 0.8 km	N/A	6
	0.8 - 0.4 km	N/A	7
	< 0.4 km	N/A	11

*N/A - nije analiziran

Rezultati studije su pokazali, da su po pitanju uticaja kiše slabog intenziteta na brzinu preporuke korišćene u priručniku HCM iz 2000. godine, precenjene. Uticaj snega jakog intenziteta na smanjenje vrednosti operativne brzine dobijen studijom, značajno je manji od preporuka iz priručnika, dok su procene uticaja za snežne padavine slabijeg intenziteta veoma slične.

Istraživanje uticaja vremenskih prilika na brzinu, na deonicama vangradske mreže na prostoru tri različite regije (Minapolis, Baltimor i Sijetl), pokazala su da kiša slabog intenziteta (0.1mm/h) utiče na smanjenje brzine slobodnog toka u opsegu od 2 do 3.6%, dok se uticaj na brzinu pri kapacitetu kreće od 8 do 10% (Hranac et al., 2006). Ovi rezultati su u skladu sa rezultatima iznetim u radu Ibrahim i Hall (1994). Utvrđeno je da od intenziteta kiše zavisi i intenzitet smanjenja vrednosti

brzine (Tabela 18). Pri intenzitetu kiše od 16mm/h rezultati istraživanja pokazali su da se brzina slobodnog toka smanjuje od 6 do 9%, dok se brzina pri kapacitetu smanjuje u opsegu od 8 do 14%. U poređenju sa kišom, analiza uticaja snežnih padavina na brzinu, dala je značajnije rezultate. Sneg slabog intenziteta (0.1mm/h) utiče na smanjenje vrednosti brzine slobodnog toka od 5 do 16%, dok se identičan uticaj ostvaruje i kada je u pitanju vrednost brzine pri kapacitetu. Takođe je u slučaju snežnih padavina dobijeno da intenzitet uticaja zavisi od intenziteta padavina. Za intenzitet snega od 3mm/h (mereno pluviometrom) dobijeno je da se intenzitet smanjenja brzine slobodnog toka i brzine pri kapacitetu kreće od 5 do 19%. Jedan od postavljenih ciljeva u studiji bio je i da se utvrdi da li se uticaji identičnih vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka razlikuju u zavisnosti od područja istraživanja. Rezultati istraživanja su prikazali značajno veća smanjenja brzine slobodnog toka i brzine pri kapacitetu pod snežnim uslovima u Minapolisu i Sjetlu nego što je to bio slučaj u Baltimoru (19%, naspram 5%). Imajući u vidu da je godišnja količina snežnih padavina veća u pomenuta dva grada nego što je to slučaj sa Baltimorom, ovako dobijeni podaci su zahtevali dodatna obrazloženja. Autori navode da se moguće obrazloženje ovakvih rezultata može naći u činjenici da su stanovnici koji su češće u prilici da voze u snežnim uslovima, svesniji opasnosti koje ovakvi vremenski uslovi donose, a samim tim su oprezniji. Na osnovu tih rezultata, poseban deo u pomenutom radu posvećen je ponašanju i navikama vozača u zavisnosti od karakteristika vremenskih prilika područja u kome živi, kao jednom od mogućih razloga ovako dobijenih rezultata.

Tabela 18 Opseg promene brzine pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika (Hranac et al., 2006)

Saobraćajni pokazatelj	Karakteristike padavina	Opseg uticaja (%)
Brzina slobodnog toka	Kiša slabog intenziteta (<0.1mm/h)	2 – 3,6
	Kiša (~16mm/h)	6 – 9
	Sneg slabog intenzitet (<0.1mm/h)	5 – 16
	Sneg (~30mm/h)	5 – 19
Brzina pri kapacitetu	Kiša slabog intenziteta (<0.1mm/h)	8 – 10
	Kiša (~16mm/h)	8 – 14
	Sneg slabog intenzitet (<0.1mm/h)	5 – 16
	Sneg (~30mm/h)	5 – 19

U istraživanjima uticaja vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka koja su realizovana na deonicama autoputa u Tokiju zabeležena je promena vrednosti srednje brzine slobodnog toka pod uticajem kiše (Chung et al., 2006). Dobijeni

rezultati su pokazali da je intenzitet kiše u direktnoj vezi sa intenzitetom smanjenja vrednosti brzine (Tabela 19). Iz tabele se vidi da se opseg promene vrednosti brzine za različite vrednosti intenziteta kiše kretao od 4.5 do 8.2%. Autori ističu činjenicu da se, i pored smanjenja brzine pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, događa veliki broj saobraćajnih nezgoda na analiziranom autoputu.

Tabela 19 Procenat smanjenja brzine pod uticajem kiše (Chung et al., 2006)

Intenzitet kiše (mm/h)	Srednja brzina slobodnog toka (km/h)	Procenat smanjenja brzine (%)
0	77.7	0
0 - 1	74.2	4.5
1 - 2	74.2	4.6
2 - 3	73.4	5.6
3 - 4	72.7	6.4
5 - 10	71.4	8.2

Unrau i Andrey su 2006. godine objavili rezultate istraživanja uticaja vremenskih prilika na promene ponašanje vozača (Unrau & Andrey, 2006). Ponašanje vozača je rezultat personalnih karakteristika vozača i faktora okruženja u kojem se vožnja realizuje. Cilj istraživanja je bio unapređenje bezbednosti saobraćaja pod uticajem kiše i ispitivanje uticaja kiše na relaciju između osnovnih parametara saobraćajnog toka. Istraživanja su sprovedena u Kanadi, na deonici Gardiner autoputa, na kojoj je brzina bila ograničena na 90km/h, a PGDS se kretao oko 90.000 vozila. Podaci o saobraćajnim parametrima sa ugrađenih senzora su prikupljeni na intervalima od 20 sekundi, ali su agregirani na petominutne intervale. Podaci o vremenskim prilikama su prikupljeni sa tri meteorološke stanice koje su se nalazile na 1.1 km, 3.1 km, i 16.1 km od lokacije istraživanja. Od ukupno snimljenih 115 kišnih sati, 105 je okarakterisano kao kiša slabog intenziteta (0.1 do 2.4 mm/h). Iz tog razloga je analiziran samo uticaj kiše slabog intenziteta na brzinu, u odnosu na suvo vreme. Na osnovu statističke analize formulisani su modeli promene srednje brzine kretanja za suvo vreme i pod uticajem kiše. Uz modele su predstavljeni i koeficijenti determinacije koji ukazuju na kvalitet formiranih modela. Pri formiranju modela uzeti su u obzir uslovi saobraćajnog toka, odnosno razmatran je uticaj na zasićeni i nezasićeni saobraćajni tok (Tabela 20).

Tabela 20 Modeli promene brzine u odnosu na uticaj kiše i saobraćajne uslove

Saobraćajni uslovi i vremenske prilike		
Suvo vreme Nezasićen tok	Prosečna brzina = $-0.018X^2+0.1265X+91.302$	$R^2=0.55$
Kiša slabog intenziteta Nezasićen tok	Prosečna brzina = $-0.018X^2+0.744X+89.286$	$R^2=0.52$
Suvo vreme Zasićen tok	Prosečna brzina = $8.6518e^{0.117X}$	$R^2=0.44$
Kiša slabog intenziteta Zasićen tok	Prosečna brzina = $7.581e^{0.121X}$	$R^2=0.42$

X – vrednost protoka saobraćaja u petominutnim intervalima

Rezultati istraživanja su pokazali da je primarna reakcija vozača u kišnim uslovima smanjenje brzine. Intenzitet i način smanjenja brzine zavisi od uslova u saobraćajnom toku, odnosno od toga da li je reč o zasićenom ili nezasićenom stanju saobraćajnog toka. U noćnim uslovima, protok saobraćaja je mali, tako da vozači u uslovima bez padavina ostvaruju brzine koje su približne maksimalnim dozvoljenim. S obzirom da je istraživanje obuhvatilo i noćni period, rezultati su pokazali da kiša slabog intenziteta u noćnim uslovima utiče na smanjenje prosečne brzine za oko 2.5 km/h (manje od 3%). Uticaj kiše slabog intenziteta u dnevnim uslovima dovodi do smanjenja brzine za oko 8 km/h (približno 10%). Samim tim se povećavaju i intervali sleđenja, što rezultira manjim vrednostima protoka saobraćaja. Oba prethodna zaključka se odnose na nezasićena stanja saobraćajnog toka. U zasićenom stanju saobraćajnog toka (karakteristično za vršne časove) zavisnost između protoka saobraćaja i brzine je veoma slična kako za kišne uslove tako i za vremenske uslove bez padavina. Smanjenje brzine je neznatno s obzirom da je vrednost brzine mala, a uticaj na promene intervala sleđenja zanemarljiv.

Cilj istraživanja sprovedenih u Istanbulu je bio da se ispita kako vremenske prilike utiču na promenu na relacije osnovnih parametara saobraćajnog toka, protoka saobraćaja, gustine saobraćaja i brzine (Akin, Sisiopiku, & Skabardonis, 2011). Zavisnosti su utvrđene pod uticajem različitih vremenskih prilika, stanjem kolovoza (suv, mokr i kolovoz prekriven ledom) i različitim strukturama saobraćajnog toka. Istraživanja su realizovana na dva glavna autoputska pravca koja su obuhvatala dva mosta preko Bosforskog moreuza. Dobijeni rezultati su pokazali da se pod uticajem kiše brzina smanjuje od 8 do 12 % (odnosno od 7 do 8 km/h). Sneg lakog intenziteta dovodi do smanjenja protoka saobraćaja od 65 do 66%, i na taj način prouzrokuje povećanje brzine od 4 do 5%. Takođe je dobijeno

da magla i izmaglica nemaju značajnog uticaja na promenu u brzini slobodnog toka, dok je kod uticaja vlažnog kolovoza na brzinu identifikovano smanjenje od 6 do 7%. Analizom uticaja strukture saobraćajnog toka na promene u međuzavisnostima osnovnih parametara saobraćajnog toka, utvrđeno je da učešće teretnih vozila u strukturi saobraćajnog toka značajno utiče na smanjenje brzine slobodnog toka tokom kišnog perioda. Za vremenske uslove bez padavina, pri učešću teretnih vozila u strukturi saobraćajnog toka od 10 do 20% uticaj na promenu prosečne brzine vozila je minoran i kreće se oko 3%, dok se smanjenje brzine slobodnog toka kreće od 8 do 25%. U kišnim danima, učešće teretnih vozila značajno utiče na smanjenje prosečne i brzine slobodnog toka. Dobijeno je da se za 10% učešća teretnih vozila ova smanjenja brzina kreću od 3 do 20%, i od 16 do 26%. Za učešće teretnih vozila u strukturi toka od 30%, za suvo vreme redukcija prosečne brzine se kreće od 6 do 22%, dok se za kišni dan kreće između 20 i 57%. Koristeći podatke dobijene na obe posmatrane deonice, autori su razvili model linearne regresije koji uzima u obzir promenu brzine u zavisnosti od strukture toka, gustine saobraćaja, temperature vazduha (C^0) i temperature kolovoza (C^0). Koeficijent determinacije od 0.895 ukazuje na kvalitet uspostavljenih zavisnosti.

$$\begin{aligned} \log_{10}(V) = & 0.486 + 0.087 \cdot \log_{10}(LV) + 0.769 \cdot \log_{10}(SV) - 0.925 \cdot \log_{10}(K) + 0.02 \\ & \cdot \log_{10}(WT) + 0.026 \cdot \log_{10}(ST) \end{aligned}$$

V – brzina [km/h]

LV – protok teških teretnih vozila [voz/h]

SV – protok lakih vozila [voz/h]

K – gustina [voz/km]

WT – temperatura vazduha [C^0]

ST – temperatura kolovoza [C^0]

Kwon i ostali (2013) su predložili model redukovanja brzine slobodnog toka u odnosu na uticaj snega i nivo vidljivosti (Kwon et al., 2013) (Tabela 21).

Tabela 21 Redukovanje brzine slobodnog toka u odnosu na padavine i stepen vidljivosti

	Koeficijenti	Standardna greška	t	Značajnost	95% interval poverenja	
					Donja granica	Gornja granica
Model 1: Kalibrisan u odnosu na sve promenljive (R ² =91%)						
Konstanta	75.33	1.77	42.6	7.10E-22	71.65	79
RSI	5.15	2.09	2.47	2.23E-02	0.81	9.49
ln (vidljivost)	5.84	0.73	8.02	7.86E-08	4.32	7.35
Model 2: Kalibrisan u odnosu na sve promenljive osim vidljivosti (R ² =76%)						
Konstanta	85.81	2.57	33.4	1.09E-19	80.47	91.15
Sneg (mm/h)	-0.86	0.18	-4.7	1.21E-04	-1.24	-0.48
RSI	9.54	2.7	3.35	1.98E-03	3.92	15.16

Utvrđeno je da sa opadanjem nivoa vidljivosti i slobodna brzina opada. Odnos između brzine slobodnog toka i vidljivosti opisan je logaritamskom funkcijom. U modelu je indeks stanja kolovoza RSI (Road surface index) u direknoj linearnoj korelaciji sa brzinom slobodnog toka, odnosno za veću vrednost RSI, veća je i brzina slobodnog toka. Takođe, utvrđen je značajan efekat intenziteta snega na redukovanje brzine slobodnog toka.

Prosečna godišnja količina kiše u Maleziji je veoma visoka i iznosi oko 2500 mm, a u zavisnosti od lokacije varijacije se kreću u opsegu od 1500 mm do 4000 mm godišnje. Mashros je 2014. godine objavio rezultate istraživanja uticaja kiše na brzinu slobodnog toka (Mashros et al., 2014). Istraživanja su realizovana su u periodu godine koji je karakterističan po obilnim padavinama od novembra 2009. godine do januara 2010. godine. Na dve autoputske deonice automatskim brojačima prikupljani su podaci o saobraćaju dok su meteorološki podaci prikupljani sa meteorološke stanice koja se nalazila na udaljenosti oko 2 km od lokacija istraživanja. Pošto je reč o deonicama sa po dve saobraćajne trake po smeru, svaka saobraćajna traka je posebno analizirana. Intenzitet kiše je podeljen u tri kategorije: kiša slabog intenziteta (do 2.5 mm/h), kiša srednjeg intenziteta (od 2.5 mm/h do 10 mm/h) i kiša jakog intenziteta (od 10 mm/h do 50 mm/h). Zabeleženo smanjenje prosečne brzine, posmatrajući obe lokacije, kretalo se od 3 do 14%. Kada je reč o brzini slobodnog toka, zabeleženo smanjenje se kretalo od 1 do 14%. Na ovaj način autori su utvrdili da bez obzira na vrednost protoka, brzina slobodnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, ne može da bude dostignuta.

U istraživanju realizovanom u Pekingu, autori su došli do zaključka da kiša ne utiče na promenu operativne brzine u meri koliko utiče na kapacitet (Jia et al., 2015). Podrazumevalo se da uticaj kiše na eksploatacionu brzinu treba meriti u nezasićenom stanju saobraćajnog toka. U konkretnom slučaju, u odnosu na karakteristike istraživanog područja, analizom su obuhvaćene brzine preko 60 km/h. Rezultati su pokazali u kojoj meri kiša utiče na smanjenje vrednosti eksploatacione brzine i brzine slobodnog toka (Tabela 22).

Tabela 22 Redukcija eksploatacione brzine i brzine slobodnog toka pod uticajem kiše

Kategorije kiše	Eksploataciona brzina (%)	Brzina slobodnog toka (%)
Kiša slabog intenziteta <2,5 mm/h	0,5 – 2	2 – 4
Kiša srednjeg intenziteta od 2,5 do 7,6 mm/h	2 – 7	4 – 6
Kiša jakog intenziteta >7,6 mm/h	3 – 9	6 – 11

Kao jedan od primera, u okviru koga krajnji rezultat rada nije predstavljala kvantifikacija uticaja već i primenljivost dobijenih rezultata, biće naveden rad objavljen od strane Choi i Cheol (2016). Oni su istraživali mogućnosti strategije upravljanja saobraćajnim tokom u zavisnosti od vremenskih prilika (Choi & Oh, 2016). Fokus u istraživanjima je stavljen na formiranje algoritma za upravljanje ograničenjima brzine VSL (Variable Speed Limit) u odnosu na prisustvo i karakteristike magle na autoputu. Predložen algoritam se sastojao iz tri osnovne komponente: monitoringa saobraćaja, predviđanja i logičkog odlučivanja o postavljenom ograničenju brzine. Istraživanja su realizovana na deonici autoputa u Seulu. Podaci o karakteristikama saobraćajnog toka i vremenskih prilika prikupljeni su iz sistema za detekciju vozila VDS (Vehicle detection system) i iz sistema za informisanje o vremenskim prilikama na putu RWIS (Road Weather Information System). Za predikciju vrednosti saobraćajnih parametara, uključujući distancu vidljivosti i brzinu, primenjena je metoda k-najbližih suseda (k-Nearest Neighbor). U svrhu implementiranja načina ponašanja vozača usled smanjenih uslova vidljivosti u VSL, korišćen je softver za mikrosimulacije saobraćaja PTV VISSIM. Ukupan broj konflikata je implementacijom algoritma VSL redukovan za 19.1% u uslovima prosečne magle, dok je u slučaju intenzivne magle redukcija u broju konflikata iznosila 27.27%.

Iako predmet istraživanja u okviru disertacije predstavlja gradska ulična mreža, u ovom delu pregleda literature predstavljeni su rezultati istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika koja su uglavnom realizovana na vangradskoj putnoj mreži. Osnovni razlog za to predstavlja činjenica da su prva istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika realizovana na ovoj kategoriji saobraćajnica. Značajni putni pravci su uglavnom opremljeni infrastrukturom koja omogućava dobijanje podataka o karakteristikama saobraćajnog toka. Sa druge strane, značajno manji broj elemenata koji bi mogli da utiču na ometanje saobraćajnog toka (za razliku od gradske ulične mreže) omogućavao je jednostavniju evaluaciju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika.

U većini istraživanja je za podatke o meteorološkim pokazateljima korišćena meteorološka stanica koja je bila locirana na aerodromu. Imajući u vidu da je u većini prikazanih istraživanja aerodrom lociran u blizini autoputa, istraživači su koristili i tu povoljnost u smislu definisanja lokacije istraživanja. Sa novijim istraživanjima i oprema koja je korišćena za formiranje obe baze podataka, kako saobraćajnih tako i o vremenskim prilikama, postala je savremenija što je omogućilo kvalitetniju procenu uticaja.

Iz predstavljenih istraživanja se može zaključiti da nepovoljne vremenske prilike utiču na promenu vrednosti analiziranih parametara, u konkretnom slučaju na kapacitet saobraćajnica i brzinu kretanja vozila. Zabeležene vrednosti promena se u različitim istraživanjima razlikuju. Kao uzroci dobijenih razlika, mogu se navesti razlike u klimatskim karakteristikama geografskih područja istraživanja, tehničkim i eksploatacionim karakteristikama saobraćajnica na kojima su istraživanja realizovana i razlike u ponašanju korisnika. Iako se dobijeni rezultati ne mogu prihvatiti kao merodavni u kontekstu uticaja na gradsku uličnu mrežu, njihova različitost jasno ukazuje na to da kvalitetna evaluacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika i na uličnoj mreži podrazumeva istraživanja na lokalnom nivou.

U narednom delu pregleda literature veća pažnja će biti posvećena istraživanjima iz oblasti uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u urbanoj sredini. Shodno tome,

biće analizirane promene saobraćajnih pokazatelja koji su karakteristični za gradsku uličnu mrežu.

3.2 UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA NA PREKINUTE SAOBRAĆAJNE TOKOVE

Prekinuti saobraćajni tokovi su karakteristični za urbane sredine. Elementima upravljanja i regulisanja saobraćaja na raskrsnicama uslovljeno je prekidanje saobraćajnih tokova na uličnoj mreži. Parametri koji se najčešće koriste u analizi ove vrste saobraćajnih tokova su zasićeni tok i vremenski gubici. U odnosu na vrednosti tih parametara, određuje se nivo usluge. Ukoliko se pretpostavi da su elementi upravljanja saobraćajem projektovani za idealne vremenske prilike, postavlja se pitanje efektivnosti elemenata u nepovoljnim vremenskim prilikama. Ova problematika dovela je do mnogobrojnih istraživanja u ovoj oblasti. Uglavnom je reč o ispitivanju mogućnosti prilagođavanja načina upravljanja saobraćajem u odnosu na novonastale okolnosti koje su prouzrokovane nepovoljnim vremenskim prilikama. U narednom delu biće predstavljena značajna istraživanja iz oblasti uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na prekinute saobraćajne tokove.

Tokom 1991. godine realizovano je istraživanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u cilju prilagođavanja signalnih planova na uličnoj mreži četiri gradska područja u Velikoj Britaniji (Gillam & Wilhill, 1992). Cilj istraživanja je bio da se uticaj nepovoljnih vremenskih prilika implementira u sistem upravljanja saobraćajem SCOOT. Istraživanja je realizovano u periodu od marta do novembra. Rezultati istraživanja su pokazali da se vrednost zasićenog toka za vlažan kolovoz smanjila za 6% dok su se vremenski gubici povećali za 11%. Ustanovljeno je da, imajući u vidu identifikovane promene u zasićenom saobraćajnom toku, SCOOT sistemom za upravljanje saobraćajem je u realnom vremenu moguće redukovati zagušenja. Autori su u zaključnim razmatranjima naveli da razlozi povećanja stepena zagušenja na uličnoj mreži u lošim vremenskim uslovima leže u promeni ponašanja vozača, i smanjenim performansama vozila, a ne u povećanom broju transportnih zahteva.

Bota i Kruz (1992) su istraživali mogućnost da se u odnosu na nepovoljne vremenske prilike, prevashodno led i sneg, optimizira signalni plan na raskrsnici (Botha & Kruse, 1992). Istraživane su promene u vrednosti zasićenog saobraćajnog toka i vremenski gubici vozila na startu, pod uslovima preostalog leda i snega na kolovozu. Istraživanja su realizovana u Ferbenksu (Aljaska). Meteorološki podaci su prikupljeni sa meteorološke stanice koja je bila locirana na aerodromu. Dobijeni rezultati analiziranih saobraćajnih pokazatelja su poređeni sa vrednostima predstavljenim u priručniku HCM iz 1985. godine. Zasićeni saobraćajni tok je proračunavan od četvrtog vozila u redu prema metodologiji iz priručnika. Identifikovane vrednosti smanjenja zasićenog saobraćajnog toka tokom zimskog perioda, u odnosu na letnji, kretale su se od 15 do 18%. Pokazano je da su vrednosti zasićenog saobraćajnog toka niže za 27% od vrednosti zasićenog toka pod uticajem istih okolnosti koje su predstavljene u priručniku HCM iz 1985. godine.

Bernardin je analizirao saobraćajnu mrežu od 24 signalisane raskrsnice na pet glavnih gradskih saobraćajnica u Enkoridžu (Aljaska) kako bi utvrdio da li se može unaprediti način upravljanja saobraćajem u zimskom periodu (Bernardin Lochmueller and Associates, 1995). Istraživanja su podrazumevala analizu parametara signalnih planova tokom letnjeg i zimskog perioda, kao i za vreme ekstremnih zimskih vremenskih uslova. Merene su vrednosti zasićenog toka, brzina vozila, vremenski gubici i kapacitet. Rezultati su pokazali da se vrednost zasićenog toka u zimskom periodu, u odnosu na letnji, smanjuje od 11 do 15% u zavisnosti od karakteristika saobraćajnice. Analizirajući vremena putovanja utvrđeno je da se brzina u zimskom periodu smanjuje za više od 16%, u odnosu na projektovanu brzinu za letnji period, odnosno idealne vremenske uslove. Rezultati istraživanja su pokazali da postojeći signalni planovi nisu optimalni, uzimajući u obzir zabeležene promene u analiziranim pokazateljima. Dobijeni rezultati su iskorišćeni za optimizaciju rada signalnih planova prilagođenih vremenskim prilikama koristeći softverske pakete SIGNAL85 i TRANSIT-7F. Testiranjem prilagođenih signalnih planova u odnosu na postojeće, simulacija je pokazala

povećanje brzine kretanja za 12%, smanjenje vremena putovanja za 13% i smanjenje prosečnih i ukupnih vremenskih gubitaka za čak 23%.

Rezultati istraživanja promene vrednosti zasićenog toka pod uticajem kiše, na dve raskrsnice u Seulu (Koreja), pokazali su da se smanjenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka kreće od 4 do 13% (Shin & Choi, 1998). Kao metoda za merenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka korišćeni su video snimci raskrsnica. U osnovi istraživanja postojale su dve ideje, kvantifikovati promenu vrednosti zasićenog toka pod uticajem kiše i razviti algoritam upravljanja saobraćajem na raskrsnici, koristeći taj podatak. Pri proračunu zasićenog saobraćajnog toka autori su koristili intervale sleđenja iza trećeg vozila u redu na raskrsnici, iako Korejski priručnik preporučuje da se za proračun kapaciteta uzimaju u obzir intervale sleđenja od šestog vozila u redu. Pri evaluaciji uticaja kiše na vrednost zasićenog toka, razlike u intenzitetu kiše nisu ekzaktno razmatrane. Kao nedostatak istraživanja se navodi mali uzorak analiziranih ciklusa. Kao jedan od zaključaka, autori navode neophodnost prilagođavanja signalnih planova nepovoljnim vremenskim prilikama, odnosno u konkretnom slučaju kiši, kroz implementaciju promene vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u algoritmu upravljanja saobraćajem na raskrsnici.

Maki je istraživao uticaj vremenskih prilika na potezu ulične mreže sa pet signalisanih raskrsnica u Minapolisu (Maki, 1999). Podaci o protoku saobraćaja su mereni u vršnim periodima pod nepovoljnim i pod dobrim vremenskim prilikama. Loše vremenske prilike su definisane snežnom olujom sa više od 7.6 cm snega. Podatke o saobraćaju činile su karakteristike signalnih planova, geometrija, brojanje saobraćaja na raskrsnicama, vreme putovanja (snimano pilot vozilom), protok saobraćaja, vremenski gubici na startu i vrednost zasićenog toka. Od podataka vezanih za meteorološke uslove prikupljani su temperatura vazduha, temperatura kolovoza, relativna vlažnost i stanje kolovoza. Za optimizaciju rada signala u lošim vremenskim uslovima korišćen je softver SYNHRO III. U simulaciji, nepovoljni uslovi su stvoreni izmenom vrednosti zasićenog toka, prosečne brzine i vremenskih gubitaka. Dobijeno je da se protok saobraćaja u vršnom periodu smanjuje od 15 do 20%, odnosno u vršnom času (od 17 do 18h) od 15 do 30%.

Prosečna brzina se smanjila sa 70 km/h, pod normalnim vremenskim uslovima, na 40km/h u odnosu na brzinu u lošim vremenskim uslovima, što je oko 40%. Takođe, rezultati istraživanja zasićenog toka su pokazali da se vrednost smanjila za oko 11% (sa 1800 na 1600 voz/čas) pod lošim vremenskim uslovima, a gubici na startu su porasli za 50% (sa 2 sekunde na 3 sekunde). Maki je rezultate istraživanja iskoristio kako bi kreirao simulaciju koordinisanog rada svetlosnih signala prilagođenih vremenskim prilikama. Rezultati simulacije su pokazali da implementacija svetlosnih signala prilagođenih vremenskim prilikama smanjuje vremenske gubitke po vozilu za oko 8%, a prosečan broj zaustavljanja se smanjuje za oko 6% u poređenju sa standardnim svetlosnim signalima. Autor je zaključio da, iako se brzina kretanja vozila smanjuje pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, vremenski gubici ne rastu drastično zbog smanjenog protoka saobraćaja. U studiji se takođe istraživala mogućnost da se signalni plan za loše vremenske prilike automatski aktivira uz pomoć nekoliko RWIS senzora koji se nalaze u blizini raskrsnice. Međutim, zaključeno je da ne postoji dovoljno jaka korelacija između podataka sa RWIS i stvarnih uslova na putevima da bi se ovo realizovalo.

U Solt Lejk Sitiju, kao području sa izuzetno izraženim zimskim periodom, sprovedena su istraživanja uticaja vremenskih prilika na dve raskrsnice (Perrin et al., 2001). Cilj rada je bio ispitati parametre za razvoj signalnih planova u nepovoljnim vremenskim uslovima. Period istraživanja obuhvatio je 14 dana sa različitim vremenskim prilikama. Predmet merenja su bili zasićeni saobraćajni tok, brzina slobodnog toka i vremenski gubici na startu. Procenat smanjenja brzine slobodnog toka i zasićenog saobraćajnog toka je prikazan u tabeli 23.

Tabela 23 Procenat smanjenja brzine slobodnog toka i zasićenog saobraćajnog toka

Redni broj	Tip vremenskih uslova	Smanjenje brzine slobodnog toka (%)	Smanjenje zasićenog saobraćajnog toka (%)
1	Suvo	0	0
2	Kiša	10	6
3	Mokar kolovoz + sneg	13	11
4	Mokar kolovoz + bljuzgavica	25	18
5	Bljuzgavica + kolotrazi	30	18
6	Utaban sneg	-	20

Zabeleženo smanjenje brzine, posmatrajući kategorije, je najveće između kategorije 3 i 4, i iznosi 12%. Kada se posmatraju promene u vrednosti zasićenog

toka situacija je identična, ali procenat smanjenja iznosi 7%. Vremenski gubici pri vlažnom kolovozu povećavaju se za 5%, dok se za kolovoz prekriven snegom povećavaju za 23% u odnosu na suv kolovoz. Ova analiza je poslužila za razvoj simulacionog modela koridora sa devet signalisanih raskrsnica u centru Solt Lejk Sitija. Rezultati modela su pokazali da se vreme putovanja u nepovoljnim vremenskim uslovima, koristeći postojeće signalne planove, povećava za 50%, dok se broj zaustavljanja vozila povećava za 14%. Nakon implementacije signalnih planova prilagođenih nepovoljnim vremenskim prilikama vreme putovanja se smanjilo za 18%, dok je broj zaustavljanja vozila opao za 9%. U pogledu prilagođavanja signalnih planova nepovoljnim vremenskim uslovima autori predlažu promene u trajanju žutog signalnog pojma za pola, odnosno za jednu sekundu u zavisnosti od veličine raskrsnice. Takođe, predlažu produženje crvenog signalnog pojma u trajanju od jedne sekunde za vreme nepovoljnih vremenskih prilika iz razloga sporijeg pražnjenja raskrsnice.

Signalni planovi prilagođeni nepovoljnim vremenskim prilikama bi trebali da budu aktivirani na osnovu procene inženjera. Donošenje odluke treba da usledi nakon analize četiri karakteristike vremenskih prilika:

1. *Ozbiljnost.* Trebala bi da postoji barem bljuzgavica na kolovozu. Takođe, ovaj kriterijum se odnosi na proveru eksploatacione brzine. Ukoliko je vrednost brzine pala ispod 70% od uobičajene vrednosti (tokom nepovoljnih vremenskih prilika), trebalo bi da se razmotri aktiviranje prilagođenih signalnih planova.
2. *Trajanje.* Predviđeno trajanje nepovoljnih vremenskih prilika mora biti pouzdano procenjeno kako bi se aktivirali novi signalni planovi. Da bi implementacija signalnog plana bila od koristi, ne bi trebalo da se vrše kratkotrajne promene planova, jer je sistemu potreban određeni period prilagođavanja novim signalnim planovima. Minimalno predviđeno vreme nepovoljnih vremenskih prilika treba da bude od 20 do 30 minuta.
3. *Područje uticaja.* Potrebno je da se donosilac odluke o implementaciji novih signalnih planova, pravovremeno i kvalitetno informiše o području uticaja nepovoljnih vremenskih prilika kako bi primenjena mera imala efekta.

4. *Protok saobraćaja.* Saobraćajni uslovi bi trebali da budu takvi da opravdaju uvođenje novih signalnih planova. Implementacijom signalnih planova na koridorima, ostvaruje se najbolji efekat. Međutim, treba voditi računa o vrednostima saobraćajnog protoka, pa se i primena ove vrste signala preporučuje za vreme vršnih časova. U noćnim i dnevnim peridima sa malim vrednostima protoka, i pored nepovoljnih vremenskih prilika, implementacija ovih signalnih planova ne bi imala značajne efekte.

U studiji sprovedenoj u Vašingtonu, autori su pokušali da procene vremenske gubitke koji nastaju na uličnoj mreži kao posledica loših vremenskih prilika (Shah, Stern, Goodwin, & Pisano, 2003). Istraživanja su sprovedena na 33 deonice, od čega je 18 deonica bilo na autoputskoj mreži, a 15 deonica na glavnim gradskim saobraćajnicama. Podaci sa terena su prikupljeni u periodu od decembra 1999. do maja 2001. godine, za svaki radni dan u periodu od 6:30 do 18:30 časova. Autori su koristili dve različite metode kako bi kvantifikovali uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja. U prvoj metodi, korelacije između vremena putovanja na analiziranim deonicama i meteoroloških podataka dobijenih sa meteoroloških stanica lociranih na najbližim aerodromima utvrđivane su regresionom analizom. U drugoj metodi, meteorološki podaci su prikupljeni pomoću radara sa većim nivoom prostorne i vremenske preciznosti interpolirajući vrednosti meteoroloških podataka i podataka o saobraćaju. Otežavajuća okolnost u kvantifikaciji uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na vremenske gubitke predstavljale su pojave saobraćajnih nezgoda kao i vremenska i prostorna razlika između meteoroloških podataka i saobraćajnih pokazatelja. I pored toga, rezultati istraživanja su identifikovali povećanje vremena putovanja u nepovoljnim vremenskim prilikama. Dobijeno povećanje prosečnog vremena putovanja pod uticajem padavina, u odnosu na primenjene metode kretalo se od 11 do 25% u vršnom periodu, dok je u okviru dvočasovnog vanvršnog perioda smanjenje variralo od 3.5 do 13%. Zanimljiv podatak koji su autori istakli je da politika sajta sa kojeg su korišćeni podaci o vremenu putovanja nije dopuštala objavljivanje podataka o ostvarenim brzinama koje su veće od dozvoljenih. Iz tog razloga autori ne izuzimaju mogućnost da su dobijeni rezultati vremena putovanja potcenjeni.

Agbolosu i ostali (2004) su istraživali uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na signalisanoj raskrsnici u Berlingonu (Vermont) (Agbolosu-Amison, Sadek, & ElDessouki, 2004). Jedan od prilaza raskrsnici je bio pod usponom od 3%. To je omogućilo ispitivanje u kojoj meri je nagib značajan kada je reč o uticaju nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajne pokazatelje. U periodu od tri meseca, svakog dana od 7 do 19h, beleženi su video zapisi saobraćaja na raskrsnici u različitim vremenskim prilikama. Na osnovu snimaka vremenske prilike su klasifikovane u šest različitih kategorija. U tabeli 24 su predstavljeni rezultati merenja zasićenog saobraćajnog toka u različitim vremenskim prilikama.

Tabela 24 Redukcija zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na analizirani prilaz

Vremenske prilike	Smanjenje zasićenog toka	
	Prilaza raskrsnici (bez uzdužnog nagiba)	Prilaz raskrsnici (sa uzdužnim nagibom)
Suv kolovoz	0%	0%
Vlažan kolovoz	3%	2%
Vlažno i snežno	7%	4%
Vlažno i bljuzgavo	7%	15%
Bljuzgavo i kolotrazi	nije dostupno	21%
Snežno i lepljivo	16%	16%

Zabeležene vrednosti smanjenja zasićenog toka kreću se od 2 do 21%. Najveće smanjenje vrednosti zasićenog toka za prilaz bez nagiba se ostvaruje pod uslovima snežnog i lepljivog kolovoza (16%), dok je na prilazu koji je pod nagibom, smanjenje najizraženije u uslovima bljuzgavice (21%). Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli veoma je teško izvući zaključak koji bi se odnosio na korelaciju smanjenja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka i uzdužnog nagiba. Dobijeni rezultati su iskorišćeni za formiranje simulacije na koridoru dužine od oko 1.7 km sa osam signalisanih i dve nesignalisane raskrsnice. Za mikrosimulaciju je korišćen softver CORSIM dok je za optimizaciju signalnih planova za idealne i nepovoljne vremenske uslove korišćen model TRANSYT-7F. Autori su predočili na koji način formiranje signalnih planova prilagođenih nepovoljnim vremenskim prilikama utiče na unapređenje efikasnosti saobraćajnog procesa u odnosu na postojeće signalne planove (Tabela 25).

Tabela 25 Efekti prilagođavanja signalnih planova nepovoljnim vremenskim prilikama

Vremenske prilike	TRANSYT-7F				CORSIM		
	Prosečna brzina	Vremenski gubici	Broj zaustavljanja	Potrošnja goriva	Prosečni vremenski gubici	Ukupni vremenski gubici	Prosečna brzina
	povećanje	smanjenje	smanjenje	smanjenje	smanjenje	smanjenje	povećanje
Vlažno	1.1%	2.7%	0.0%	1.3%	2%	1.7%	0.7%
Vlažno i snežno	1.1%	2.6%	1.9%	0.6%	3.5%	3.1%	1.5%
Vlažno i bljuzgavo	2.6%	6.0%	3.6%	1.9%	3.5%	3.2%	1.6%
Bljuzgavo i kolotrazi	6.5%	12.9%	8.3%	4.5%	2.3%	1.6%	0.9%
Snežno i lepljivo	4.3%	9.7%	5.1%	3.0%	3.9%	3.4%	1.4%

Pored prosečnih vrednosti vremenskih gubitaka i brzine, modelirana je i ušteta u potrošnji goriva. Svi rezultati simulacija prikazani u tabeli idu u korist prilagođavanja signalnih planova nepovoljnim vremenskim prilikama. Autori takođe navode i da su rezultati simulacije koja je realizovana u softveru CORSIM bili približniji rezultatima zabeleženim u istraživanjima.

I u radu, koji su publikovali Lieu i Ph (2004), korišćen je softver CORSIM kako bi se simulacijom vrednovali efekti implementacije signalnih planova prilagođenih nepovoljnim vremenskim prilikama (Lieu & Ph, 2004). Za optimizaciju prilagođenog načina upravljanja korišćen je softver SYNHRO. Simulacija je podrazumevala koridor sa četiri signalisane raskrsnice. Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika je simuliran pod pretpostavkom da izaziva efekat smanjenja brzine slobodnog toka, povećanja vremenskih gubitaka na startu i povećanje intervala sleđenja pri pražnjenju reda za 20%, u odnosu na normalne vremenske uslove. Takođe je pretpostavljeno da se intenzitet protoka saobraćaja u tim uslovima smanjuje za 15%. Obe pretpostavke su rezultat ranijih istraživanja na koje se autor u radu poziva. Simulacijom su testirana tri scenarija:

1. postojeći signalni planovi u normalnim vremenskim prilikama,
2. postojeći signalni planovi u nepovoljnim vremenskim prilikama i
3. signalni planovi prilagođeni nepovoljnim vremenskim prilikama.

Intenziteti protoka saobraćaja za koje je realizovana simulacija kretali su se od 1000 do 1800voz/h. Rezultati simulacije su pokazali da u drugom scenariju dolazi

do smanjenja prosečne brzine na posmatranom koridoru za oko 36%, (prosečna brzina se smanjuje sa 25 milja/h na 16 milja/h), dok se vremenski gubici na startu povećavaju za 20%. Autori su došli do rezultata koji su pokazali da implementacija signalnih planova prilagođenih nepovoljnim vremenskim prilikama, ne doprinosi smanjenju vremena putovanja za veličinu protoka saobraćaja ispod 1100 voz/h (nezasićeno stanje) i iznad 1700 voz/h (prezasićeno stanje), odnosno za brzinu ispod 7milja/h i iznad 25milja/h. U okviru tog intervala, na primer, za veličinu protoka saobraćaja od 1230 voz/h, novi signalni planovi doprinose povećanju brzine sa 16 milja/h na 19 milja/h. Testirajući rezultate simulacije u odnosu na nivoe usluga, autori su pokazali da postoji opravdanost za uvođenjem signalnih planova prilagođenih nepovoljnim vremenskim prilikama.

Usled velikih ekonomskih gubitaka prouzrokovanih zagušenjima u Japanu potraga za efikasnijim upravljanjem postojećim kapacitetom bila je pokretač istraživanja Wang-a i ostalih (2006) (Wang et al., 2006). Za potrebe istraživanja iskorišćena je taksi služba grada Nagoje (Japan) koji je činilo 1570 vozila opremljenih GPS uređajima. Sa vozila su prikupljane informacije o brzini i pravcu kretanja vozila, vremenima zaustavljanja, ubrzanju i vremenu rada agregata vozila. Podaci su prikupljeni u periodu od dva meseca, od maja do juna 2004. godine. U cilju dobijanja podataka o vremenu putovanja na deonici, korišćen je "Map matching" algoritam sa digitalnom putnom mrežom Japana. U analizu su uključene deonice duže od 100 metara, dok su u pogledu brzine, deonice sa brzinama preko 100 km/h i ispod 3.6 km/h bile izopštene iz analize.

Informacije o padavinama prikupljane su sa meteorološke stanice na nivou intervala od 10 minuta. Klasifikacija intenziteta padavina je prikazana u tabeli 26.

Tabela 26 Kategorizacija kiše

Kategorija padavina	Intenzitet padavina (mm/h)
Kiša slabog intenziteta	0,5-4
Kiša jakog intenziteta	>4.5
Kiša veoma jakog intenziteta	>10
Bez padavina	0

S obzirom da je brzina kretanja vozila usko povezana sa kategorijom saobraćajnice, formirano je šest kategorija saobraćajnica (od deonice autoputa pa do

saobraćajnica nižih kategorija), što je predstavljalo dodatni kriterijum uz nepovoljne vremenske prilike. Utvrđeno je da se na saobraćajnicama na kojima se ostvaruje najveća brzina u normalnim uslovima, u prisustvu padavina beleži i najveće smanjenje brzine. Analiza rezultata istraživanja je pokazala da se ukupno vreme putovanja pod uticajem kiše slabog intenziteta povećalo za 10%, dok se za pod kišom veoma jakog intenziteta vreme putovanja povećalo za 18%.

Autori su testirali nekoliko modela linearne regresije u cilju opisa promene brzine kretanja pod uticajem kiše u odnosu na suvo vreme. Koeficijent determinacije se u svakom od predloženih modela kretao između 0.01 i 0.015 što je pokazalo da se veza između analiziranih parametara ne može kvalitetno opisati linearnom regresijom. Autori ovakve rezultate opravdavaju zanemarivanjem ostalih faktora koji utiču na brzinu kao što su kapacitet saobraćajnica i signalisane raskrsnice. Rezultati istraživanja su pokazali da kiša utiče na smanjenje vrednosti brzine kretanja vozila. Autori ističu važnost ispitivanja brzine i u idealnim vremenskim prilikama kako bi se utvrdile kvalitetne zakonitosti promene pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika.

Istraživanje koje je realizovano u tri poljska grada, imalo je za cilj da oceni varijabilnost zasićenog saobraćajnog toka na signalisanoj raskrsnici tokom perioda zagušenja (Chodur, Ostrowski, & Tracz, 2011). Promenljiva u odnosu na koju su analizirane promene u vrednosti zasićenog toka bile su vremenske prilike. Istraživanja su sprovedena na tri izolovane raskrsnice u Krakovu, Varšavi i Žešovu. Ukupno je snimljeno 38 275 ciklusa sa ukupnim trajanjem snimaka od 1 155 sati. Rezultati istraživanja su pokazali da se varijabilnost vrednosti zasićenog toka u odnosu na različite vremenske prilike (sunčano vreme, oblačno sa suvim i vlažnim kolovozom, kratkotrajna i dugotrajna kiša, snežne padavine), najbolje opisuje Gama i Vejbulovom raspodelom. Identifikovane vrednosti relativnog smanjenja vrednosti zasićenog toka se kreću od 8.5 do 12.3% u uslovima dugotrajnih kišnih padavina dok za kratkotrajne padavine ova vrednost iznosi približno 3.6%. Snežne padavine dovele su do smanjenja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za oko 10%, dok je po oblačnom vremenu i magli ovo smanjenje iznosilo 11.4%. Kao faktori od uticaja na veličinu zasićenog toka identifikovani su veličina raskrsnice,

lokacija raskrsnice i aktivnosti u neposrednoj blizini. Autori navode da veći transportni zahtevi i duži red na raskrsnici utiču na veću baznu vrednost zasićenog toka kao posledica dinamičnog ponašanja vozača. Takođe se navodi da je u skladu sa razvojem tehnologije moguće instalirati senzore osetljive na vremenske prilike na raskrsnicama. Zadatak senzora bi bio da aktiviranjem definisanih programa rada signala omoguće prilagođavanje vremenskih gubitaka na startu u različitim vremenskim prilikama osiguravajući na taj način adekvatnu vrednost zasićenog saobraćajnog toka, odnosno kapacitet raskrsnice.

Svako geografsko područje odlikuje se različitim klimatskim karakteristikama. Tako su u radu Sisopiku i Salivan (2011) prezentovani rezultati studije u kojoj je fokus stavljen na analizu uticaja kiše na saobraćajni tok, kao najfrekventnijeg oblika nepovoljnih vremenskih prilika u tom području (Akin et al., 2011). Istraživanje je realizovano u Birmingemu (Alabama). Studija je imala za cilj da utvrdi u kojoj meri kiša utiče na efikasnost signalnih planova, odnosno u kojoj meri se može unaprediti kvalitet opsluge na raskrsnici implementacijom signalnih planova prilagođenih uticaju kiše i da ispita opravdanost implementacije ove vrste signalnih planova. Za ispitivanje efekata scenarija implementacije signalnih planova prilagođenih uticaju kiše, korišćeni su softveri SYNHRO i SIMTRAFFIC. Istraživanja su realizovana na dva koridora. Prvi koridor je bio dužine oko 8 km, sa devet signalisanih raskrsnica, dok je drugi koridor bio dužine 1.3 km i sadržao je sedam signalisanih raskrsnica. Podaci o protoku saobraćaja i brzini dobijeni su sa detektora, a vrednost zasićenog saobraćajnog toka je merena manuelno. Podaci o intenzitetu i dužini trajanja kiše su dobijeni sa radara. Rezultati istraživanja su pokazali da je uticaj kiše izazvao smanjenje brzine od 4 do 7%. Zabeležene varijacije u smanjenju vrednosti protoka saobraćaja pod uticajem kiše su se kretale od 0 do 4%. Smanjenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, pod uticajem kiše slabog intenziteta, kretalo se od 0 do 4%, dok se pod uticajem kiše srednjeg intenziteta smanjenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka kretalo od 3 do 9%. Istraživanja nisu obuhvatila uticaj kiše jakog intenziteta, a u studiji nije eksplicitno navedena kategorizacija kiše po intenzitetima. Rezultati scenarija kreiranih simulacija saobraćaja na dva analizirana koridora pokazali su da:

- Kiša srednjeg intenziteta utiče na porast broja zaustavljanja vozila i povećanje vremenskih gubitaka od 1 do 6%, zavisno od protoka saobraćaja.
- Signalni planovi prilagođeni uticaju kiše, smanjuju vrednost vremenskih gubitaka u pojedinim slučajevima i za 50%, ali njihova efektivnost zavisi od protoka saobraćaja.
- Najbolji efekti primene prilagođenih signalnih planova beleže se za vrednosti protoka između 40% i 80% od vrednosti kapaciteta na karakterističnoj raskrsnici. Ispod vrednosti iskorišćenja kapaciteta od 40% uticaj primene ovih signalnih planova donosi veoma mala poboljšanja, kao i za vrednosti iskorišćenja kapaciteta iznad 80%.

U modeliranju raskrsnica sa svetlosnom signalizacijom zasićeni tok predstavlja parametar od ključnog značaja (Asamer & Van Zuylen, 2012). Autori navedenog rada, Asamer i Van Zuylen (2012), su se upravo bavili istraživanjem uticaja različitih vremenskih prilika na vrednost promene zasićenog saobraćajnog toka. Uočene vrednosti u promeni zasićenog toka iskorišćene su za kalibrisanje parametara mikrosimulacionog modela u softverskom paketu VISSIM. Podaci korišćeni u radu su dobijeni sa video snimaka tri nezavisne raskrsnice u Beču (Austrija). Snimci su načinjeni za četiri različita dana, dva u januaru 2005. godine i dva 2010. godine. Meteorološki podaci su prikupljeni sa meteoroloških stanica na udaljenosti oko 3 km od istraživanih lokacija. Kategorizacija vremenskih prilika je predstavljena u tabeli 27.

Tabela 27 Kategorije analiziranih vremenskih prilika

Kategorije vremenskih prilika
Lake padavine (0,5mm/10min) i kolovoz prekriven snegom
Lake padavine (0,5mm/10min) i mokar kolovoz
Teške padavine (2 mm/10min) i kolovoz prekriven snegom
Teške padavine (2 mm/10min) i mokar kolovoz
Suv kolovoz bez padavina

Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka su se istraživale samo za saobraćajnu traku pravo. Rezultati istraživanja su pokazali da nepovoljni vremenski uslovi definitivno imaju uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka (Tabela 28).

Tabela 28 Promene u vrednosti zasićenog saobraćajnog toka

Vrednost zasićenog toka u normalnim uslovima (voz/h/saob.traci)	Lokacija 1	Lokacija 2	Lokacija 3
		1821	1641
Padavine jakog intenziteta / vlažan kolovoz	14.8%	4%	1.5%
Padavine lakog intenziteta / vlažan kolovoz	8.8%	5.5%	3%
Padavine jakog intenziteta / kolovoz prekriven snegom	22.8%	21.1%	20.3%
Padavine slabog intenziteta / kolovoz prekriven snegom	33.2%	24.9%	19.8%

Ustanovljeno je da uticaj padavina nije vidljiv ako je sneg već duže vreme na kolovozu. Na pojedinim lokacijama (Lokacija 1 i Lokacija 2) uticaj snežnih padavina slabog intenziteta na vrednost zasićenog saobraćajnog toka je intenzivniji od uticaja padavina jakog intenziteta, za kolovoz prekriven snegom. Autori kao razloge navode različite vrste snega na kolovozu (utabani sneg ili mokr sneg). Na Lokaciji 2 i Lokaciji 3 nisu zabeležene velike razlike u promeni vrednosti zasićenog toka pod uticajem padavina različitog intenziteta, u uslovima vlažnog kolovoza. U cilju prilagođavanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za potrebe mikrosimulacije u softveru VISSIM, autori predlažu kalibraciju brzine slobodnog toka i rastojanja sleđenja.

Za razliku od većine navedenih radova u okviru kojih se istraživala vrednost zasićenog saobraćajnog toka za traku pravo, istraživanje na raskrsnici u Šangaju odnosilo se na dve saobraćajne trake u zaštićenom levom skretanju (Sun et al., 2013). Metodologija je bila koncipirana iz tri dela. Prvi deo je podrazumevao sistematizaciju podataka neophodnih za ispitivanje korelacije između vremenskih prilika i saobraćajnih parametara. U drugom delu je ocenjivana promena vrednosti zasićenog saobraćajnog toka i vremenskih gubitaka na startu, dok su u trećem delu ispitivane razlike između dobijenih rezultata u odnosu na analizirane saobraćajne trake. Analiza vremenskih gubitaka na startu i vrednosti zasićenog toka je realizovana uz pomoć video kamera. Izračunavanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka bilo je bazirano na utvrđivanju prosečnih intervala sleđenja između šestog i petnaestog vozila u redu:

$$h_i = T_i - T_{i-1} \quad i = 2,3 \dots \quad h_1 = SRT + \frac{T_5 - T_1}{4} \quad h_s = \frac{\sum_{i=6}^{15} h_i}{10}$$

i – pozicija vozila u redu

h_i – interval sleđenja i -tog vozila

h_s – interval sleđenja pri zasićenom saobraćajnom toku

SRT – vreme reakcije prvog vozila u redu (od 0.8-1.2s)

T_i – zabeleženo vreme prolaska prednje osovine vozila preko zaustavne linije

Vremenski gubici na startu su podrazumevali sumu vremena reakcije prvog vozila u redu i vremena prolaska prvih pet vozila u redu. Uzorak je podrazumevao dva sata snimka za dan bez padavina i dva sata snimka za kišni dan. Podaci o vremenskim prilikama su dobijeni sa sajta kineskog javnog meteorološkog centra. Informacije o intenzitetu padavina prikupljane su na časovnom nivou, a meteorološka stanica je bila locirana oko 4 km od lokacije istraživanja. Ukupno je zabeleženo 994 intervala sleđenja i za suvo vreme i pod padavinama lakog intenziteta. Za poređenje rezultata promena vrednosti vremenskih gubitaka na startu i zasićenog saobraćajnog toka pod uticajem različitih vremenskih prilika primenjena je statistička metoda ANOVA. Rezultati su pokazali da se za vreme padavina u obe saobraćajne trake vrednost zasićenog toka smanjuje od 3 do 7%, dok se povećanje vremenskih gubitaka na startu kreće od 21 do 33%, u odnosu na suvo vreme. Nisu utvrđene statistički značajne razlike kada je reč o lokaciji saobraćajne trake u odnosu na promene u analiziranim parametrima.

S obzirom da tematika disertacije podrazumeva implementaciju uticaja vremenskih prilika u proceduru modeliranja saobraćajnog opterećenja, u pregledu literature su uglavnom predstavljena istraživanja u okviru kojih je uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na analizirane saobraćajne parametre kvantifikovan. To svakako predstavlja jedan od prvih koraka u istraživanjima ove vrste. Sa druge strane, treba imati u vidu da, ukoliko se utvrdi da nepovoljne vremenske prilike prouzrokuju bilo kakvu vrstu problema, isti se kvantifikacijom ne rešava. U tom kontekstu biće navedeno i nekoliko primera prilagođavanja elemenata saobraćajnog sistema uticaju nepovoljnih vremenskih prilika.

Pisano i Goodwin (2004) su u svom radu naveli dva konkretna primera implementacije faktora uticaja u procedure upravljanja saobraćajem (Pisano & Goodwin, 2004). U Šarlotu u Severnoj Karolini na 24% raskrsnica (149 raskrsnica) postoji mogućnost prilagođavanja signalnih planova nepovoljnim vremenskim prilikama, promenom trajanja ciklusa. Osnovna svrha prilagođenih signalnih planova je redukcija brzine kretanja vozila klizavim kolovozom. Operater manuelno menja postojeće signalne planove u zavisnosti od vrste i intenziteta vremenskih prilika ili u slučaju da postoji kvalitetna prognoza da do nepovoljnih vremenskih prilika može doći. Autori navode da nakon implementacije ovih signalnih planova brzina kretanja vozila opadne od 8 do 16 km/h. Na Floridi je takođe instaliran sistem koji modifikuje signalne planove na problematičnoj deonici tokom čestih oluja sa grmljavinom u popodnevnim časovima. Pomenuta deonica predstavlja usko grlo pri pojavi nepovoljnih vremenskih prilika. U situaciji kada se na posebnom detektoru identifikuje kiša jakog intenziteta, signal se automatski šalje kontrolerima i menjaju se signalni planovi čitavom dužinom kritične deonice. Prilagođene signalne planove karakteriše duže trajanje zelenih vremena.

Sa razvojem informacionih tehnologija i softverske industrije, implementacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u sistem upravljanja saobraćajem postala je sofisticiranija. U radu koji su objavili Chen i ostali (2015), prikazana je strategija implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u dinamičko upravljanje saobraćajem (Chen et al., 2015). Prilagođeni signalni planovi za upravljanje u realnom vremenu su formirani uz pomoć sistema za procenu i predikciju saobraćaja TREPS (Traffic estimation and prediction system), koji je baziran na softveru za upravljanje saobraćajnim opterećenjem u realnom vremenu DYNASMART-X. Na Arhitektura sistema je predstavljena na slici 4.

nepovoljnih vremenskih prilika preporučuje da se i kada su u pitanju prekinuti tokovi istraživanja realizuju na lokalnom nivou. Deo predstavljenih istraživanja je baziran na kvantifikaciji uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, bez primene odgovarajućih mera u odnosu na dobijene rezultate, dok se drugi deo bazira na primeni dobijenih rezultata za prilagođavanje sistema upravljanje saobraćajem, ili simulacije na mikro nivou.

Procena uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na uličnoj mreži je otežana velikim brojem drugih faktora uticaja koje treba uzeti u obzir. Ukoliko je cilj ispitati uticaj nepovoljnih vremenskih prilika, sve ostale potencijalne uticaje bi trebalo minimizirati. S obzirom na to i nivo detaljnosti analize je veći. U principu, intenzitet uticaja nepovoljnih vremenskih prilika zavisi od ponašanja i reakcije korisnika na promenu uobičajenih uslova okruženja u kom se realizuje vožnja, a istraživanje ponašanja korisnika je veoma kompleksan zadatak. Važno je istaći da se u modeliranju opterećenja ulične mreže promene ne posmatraju na nivou pojedinačnog korisnika, već na nivou saobraćajnog toka. U tom slučaju se kroz promenu pokazatelja koji definišu ponudu saobraćajnog sistema kao što su kapacitet ulične mreže, prosečno vreme putovanja ili prosečna brzina kretanja, ocenjuje uticaj nepovoljnih vremenskih prilika.

U većini prikazanih radova istraživanja su sprovedena na deonici ili na određenom broju raskrsnica. Međutim, postoje istraživanja u okviru kojih je uticaj nepovoljnih vremenskih prilika procenjivan na većem prostornom obuhvatu, odnosno na makro nivou. Procena uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na makro nivou je uglavnom bazirana na analizi promene vrednosti vremena putovanja na posmatranom delu ulične mreže.

3.3 OCENA UTICAJA NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA NA MAKRO NIVOU

Na osnovu prikazanih rezultata istraživanja može se zaključiti da nepovoljne vremenske prilike imaju direktan uticaj na pojedine parametre transportnog sistema kao što su kapacitet ulične mreže, vremenski gubici i brzina kretanja

vozila. Imajući navedeno u vidu, pretpostavka je da nepovoljne vremenske prilike indirektno utiču i na vreme putovanja korisnika saobraćajnog sistema.

Prilikom putovanja koja se svakodnevno ponavljaju, korisnik nakon određenog vremena formira percepciju o trajanju vremena putovanja. Ukoliko se putovanje realizuje u toku vršnog perioda, korisnik u percepciju o vremenu putovanja uključi i vremenske gubitke nastale usled svakodnevnih zagušenja koja se javljaju na uličnoj mreži. Kada se putovanje realizuje u uobičajenim uslovima saobraćaja, čak i uz prisutna konstantna zagušenja, korisnik ima mogućnost da planira vreme putovanja. Međutim, problem nastaje kod pojave neplaniranih događaja koji multipliciraju vremenske gubitke. U tom slučaju, korisnik će dodatno vreme provesti u putovanju. Posmatrajući sa ekonomskog gledišta, uvećavaju se i troškovi putovanja izraženi preko potrošnje goriva i negativnih posledica usled kašnjenja na odredište. Sa aspekta zaštite životne sredine, povećavaju se emisije štetnih gasova. Jedna od pojava koja može da utiče na neplanirano povećanje vremena putovanja su i nepovoljne vremenske prilike.

Iz navedenih razloga realizovana su istraživanja koja na makro nivou opisuju posledice nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja. Tsapakis i ostali (2013) sprovedli su istraživanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja u okviru šireg područja grada Londona (Engleska) (Tsapakis et al., 2013). Cilj je bio ispitati na koji način sneg, kiša i temperatura utiču na promenu vremena putovanja na makro nivou. Istraživanje je realizovano iz nekoliko koraka. Prvo je istraživana prostorno-vremenska korelacija baze podataka o padavinama. U Londonu je uobičajeno da u različitim delovima grada postoji značajna razlika između intenziteta padavina. Drugi korak je podrazumevao poređenje efekata različitih intenziteta padavina na vreme putovanja tokom jutarnjih, popodnevni i večernjih časova. U narednom koraku istraživane su razlike u navedenim efektima u odnosu na prostorni položaj saobraćajnice u gradu (centralna gradska zona ili periferija). Poslednji korak podrazumevao je generisanje rezultata i poređenje sa rezultatima iz predhodnih istraživanja. Baza podataka o saobraćaju je obezbeđena od strane organa lokalne uprave za transport. Podaci su prikupljeni preko sistema kamera za identifikaciju registarskih tablica. Baza podataka o meteorološkim

uslovima je prikupljana iz sedam meteoroloških stanica, od kojih su dve locirane u centralnoj gradskoj zoni, jedna u širem centru grada, a četiri na periferiji. Istraživanje je trajalo od 1. oktobra do 10. decembra 2009. godine. Za razliku od većine navedenih istraživanja koja su realizovana na deonici ili segmentu ulične mreže, cilj ovog istraživanja je bio da se predstavi uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na promenu ukupnog vremena putovanja, na kompletnoj uličnoj mreži. U narednoj tabeli su prikazani rezultati istraživanja vremena putovanja na uličnoj mreži Londona, pod uticajem različitih vremenskih prilika, kao i rezultatima ranijih istraživanja u ovoj oblasti (Tabela 29). Promene u vremenu putovanja su izražene preko operativne brzine.

Tabela 29 Uporedni rezultati istraživanja uticaja vremenskih prilika

Kategorija vremenskih prilika	Smanjenje operativne brzine							
	HCM (2000)	Ibrahim i Hall (1994) (km/h)	Kyte et al. (2001) (km/h)	Smith et al. (2004) (%)	Agarwal et al. (2005) (%)	Maze et al. (2005) (%)	Ova studija (2010) (%)	
Kiša (mm/h)	0-0.2	2-14	0-13	9.5	3-5	1-2.5	2	0.1-2.1
	0.2-6	2-14	0-13	9.5	3-5	2-5	4	1.3-3.8
	>6	5-17	5-10	9.5	3-5	4-7	6	3.6-6
Sneg (mm/h)	<1	8-10	0-8	16.4	N/A	3-5	4	5.5-7.6
	1-2	8-10	0-8	16.4	N/A	2-9	8	5.5-7.6
	2-12	8-10	0-8	16.4	N/A	8-10	9	7.4-11.4
	>12	30-40	38-60	16.4	N/A	11-15	13	7.4-11.4
Temp. (°C)	1-10	N/A	N/A	N/A	N/A	1-1.5	1	-1.2 do 1.9
	0 do -20	N/A	N/A	N/A	N/A	1-2	1	-0.9 do 3.2
	<-20	N/A	N/A	N/A	N/A	0-16	2	-0.9 do 3.2

N/A-nije analizirano

Razlike u pojedinim rezultatima istraživanja su primetne. Uzroci dobijenih razlika mogu biti mnogobrojni, počev od različito merenih intenziteta padavina, karakteristika saobraćaja, različitih socioekonomskih podataka, ponašanja vozača, i drugo.

U skladu sa većinom prethodnih studija rađenih na ovu temu, rezultati ovog istraživanja pokazali su najmanji uticaj kiše slabog intenziteta na vreme putovanja (smanjenje od 0.1 - 3.8%). Kiša jakog intenziteta prouzrokuje veće vremenske gubitke, koji su generalno manji od vrednosti definisanih u priručniku HCM iz 2000. godine, ali su veoma bliske vrednostima dobijenih u radovima Agarwal et al. (2005) and Maze et al. (2005). U ove dve studije su takođe dobijene slične

vrednosti smanjenja brzine pod uticajem snega slabog intenziteta, dok su dosta veća smanjenja dobijena kada je reč o snegu jakog intenziteta. Važno je napomenuti da rezultati promene karakteristika saobraćajnog toka variraju i kod različitih područja istraživanja. Na primer, u zemljama severne Evrope, u kojima snežne padavine tokom zimskih meseci predstavljaju pojavu velike učestanoosti vozači se drugačije ponašaju u odnosu na vozače zemalja u kojima su snežne padavine retkost. Slično kao i u ranijim istraživanjima, ustanovljeno je da temperatura nema veliki uticaj na promenu brzine kretanja vozila, dok je kod nemotorizovanih kretanja promena temperature vrlo značajna i utiče na promene karakteristika kretanja ovog vida saobraćaja (Koetse & Rietveld, 2009). Niske temperature vrlo malo utiču na povećanje vremena putovanja, i često se u slučaju niskih temperatura njihov uticaj analizira istovremeno sa snežnim padavinama. U prezentovanom radu su dobijena manja smanjenja brzine nego što je to predstavljeno u HCM 2000 i u nekoliko drugih studija koje su se bavile ovom problematikom. Postoji nekoliko mogućih razloga za obrazloženje. Na prvom mestu, ovo istraživanje je rađeno na velikom broju gradskih saobraćajnica na kojima je operativna brzina manja od deonica na autoputevima na kojima su rađena istraživanja u Americi i Kanadi. Drugi razlog je što su u većini studija brzine dobijane kao srednje vrednosti (na osnovu podataka sa detektora), što je obično manje precizno od metodologije primenjene u predmetnoj studiji. Treći razlog može biti vezan za dobijene rezultate iz ove studije koji pokazuju da su veće promene u brzinama putovanja zabeležene na dužim saobraćajnicama, pa se očekuje da smanjenje brzine, usled loših vremenskih prilika, na gradskim saobraćajnicama bude manje u odnosu na smanjenja brzine koja su merena na vangradskim saobraćajnicama i autoputevima u ostalim studijama.

Veoma je važno kvantifikovati uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja u saobraćajnom sistemu. Kao rezultat kvalitetne kvantifikacije, dolazi se do saznanja o pouzdanosti vremena putovanja pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika. Pouzdanost vremena putovanja je veoma važan parametar kvaliteta kod planiranja saobraćaja i upravljanja saobraćajnim sistemom. Jedna od opštih definicija pouzdanosti sistema koju je dao Ebeling (1997) glasi: "Pouzdanost

predstavlja verovatnoću da će komponenta ili sistem uspešno obavljati svoju funkciju u unapred određenom vremenskom periodu pod unapred propisanim uslovima” (Ebeling, 1997). Ako bi se predstavljena definicija u modifikovanom obliku transferovala u kontekst vremena putovanja u saobraćajnom sistemu, moglo bi se reći da pouzdanost vremena putovanja predstavlja nivo varijabilnosti između očekivanog vremena putovanja (na osnovu reda vožnje ili prosečnog vremena putovanja) i realno ostvarenog vremena putovanja. Definisano je sedam osnovnih faktora koji doprinose varijabilnosti vremena putovanja, a to su: kapacitet, saobraćajne nezgode, zone radova, vremenske prilike, način upravljanja, vanredne situacije i neravnomernosti saobraćajnog toka (Cambridge Systematics Inc, 2005). Ukoliko se posmatra vreme putovanja između dve tačke na mreži, ono može da varira i u zavisnosti od perioda dana u kom se putovanje realizuje i od dana u nedelji, kao što i dva vozila koja prolaze istu rutu i istom periodu u toku dana mogu da imaju različite brzine kretanja. Varijabilnost vremena putovanja praktično se može shvatiti kao jedna od najznačajnijih komponenti ulaznih podataka za procenu pouzdanosti saobraćajnog sistema.

Yazici i ostali (2013) su istraživali uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja i varijacije u vremenu putovanja u Njujorku (Yazici, Kamga, & Singhal, 2013). Većina prethodnih istraživanja varijabilnosti vremena putovanja je uglavnom realizovana na deonicama autoputeva (Chien & Kolluri, 2010; Tu, van Lint, & van Zuylen, 2007). Za bazu podataka o saobraćajnim pokazateljima korišćeni su GPS zapisi kretanja vozila taksi službe. U periodu od 1. januara 2009. do 28. novembra 2010. godine zabeleženo je ukupno 370 miliona putovanja. Podaci o karakteristikama vremenskih prilika su prikupljeni sa sajta www.wunderground.com. Varijabilnost u vremenu putovanja je analizirana za sve dane u toku nedelje, vremenske periode u toku dana i različite kategorije vremenskih prilika. Za modelovanje dobijenih podataka korišćena je tehnika klasifikacionih i regresionih stabala (Breiman, Friedman, Stone, & Olshen, 1984). Ova tehnika predstavlja spoj statistike i veštačke inteligencije, a kao jedna od osnovnih prednosti metode navodi se mogućnost validacije modela nad istim podacima na osnovu kojih je model formiran. Još jedna od karakteristika ove

tehnike je mogućnost kombinovanja kategorijskih i kontinualnih promenljivih. Rezultati istraživanja su pokazali da vremenske prilike imaju uticaj na varijabilnost vremena putovanja, kako na nivou dana u nedelji tako i na nivou različitih perioda u toku dana. Interesantno je da su rezultati pokazali da efekat uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja nije konzistentan u odnosu na period u toku dana. Uticaj je izraženiji tokom vanvršnih perioda. Kako ulična mreža postaje zagušenija, tako se uticaj nepovoljnih vremenskih prilika smanjuje. Kada je reč o varijabilnosti vremena putovanja, dobijeno je da vremenske prilike redukuju varijabilnost, posebno tokom vanvršnih perioda. Pri visokim vrednostima zagušenja uticaj spoljnog faktora kao što su vremenske prilike je ograničen, i proizvodi manje efekte u odnosu na efekte istog uticaja tokom vanvršnih, nezagušenih perioda. Pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, vozači uglavnom smanjuju brzinu, povećavajući vreme putovanja, ali istovremeno i smanjuju razlike u odnosu na druga vozila na mreži, što rezultuje smanjenom varijabilnošću. Za razliku od većine istraživanja u kojima su rezultati pokazali da nepovoljne vremenske prilike utiču i na povećanje vremena putovanja i varijabilnosti, u okviru ovog rada izneti su drugačiji rezultati. Autori obrazlažu tako dobijene rezultate drugačijim načinom predstavljanja varijabilnosti vremena putovanja. U većini studija varijabilnost je merena standardnim odstupanjem dok je u okviru ove studije u tu svrhu korišćen koeficijent varijacije. Sa druge strane, autori navode da su prethodna istraživanja uglavnom obuhvatala autoputske deonice, a ovde je reč o uličnoj mreži. Kako autori navode, imajući u vidu da varijabilnost (odnosno pouzdanost) vremena putovanja predstavlja jedan od parametara kvaliteta transportne usluge (Chao, Alexander, & Pravin, 2003), važan faktor u formiranju politika razvoja i investicionih odluka (Lyman & Bertini, 2008), komponentu cost-benefit analiza (Peer, Koopmans, & Verhoef, 2012) i parametar u različitim drugim aspektima analize transportnog sistema, veoma je važno kvantifikovati faktore koji na varijabilnost vremena putovanja imaju uticaj. Dodatno o značaju govori i poseban izveštaj S2-L08-RW-1 izdat od strane TRB (Transportation Research Board) sa ciljem implementacije pouzdanosti vremena putovanja u procedure predstavljene u priručniku HCM.

Kada je reč o oceni pojedinih pokazatelja saobraćajnog sistema na makro nivou, uglavnom se dobijeni podaci koriste za definisanje strateških odluka. Strateške odluke se odnose na kompletan saobraćajni sistem, a ne na njegovu komponentu ili element, i karakteristične su za procedure planiranja saobraćaja. Istraživanja realizovana u Gvangdžou (Kina) bazirana su na analizi mogućnosti primene metoda makroskopske analize unapređenja nivoa usluge u saobraćajnom sistemu, u kišnim uslovima (Xu et al, 2013). Na nivou kompletne ulične mreže uticaj kiše povećava neizvesnost kod promene performansi saobraćajnog sistema. U okviru pomenutog istraživanja primenjen je makroskopski analitički metod za upravljanje saobraćajem MFD (Macroscopic Fundamental Diagram). Daganzo (2005) je prvi put primenio navedeni metod sa ciljem da se unapredi mobilnost, da se utiče na redukovanje zagušenja na putnoj i uličnoj mreži i da se utvrdi nivo usluge ulične mreže (Daganzo, 2005). Osnovna ideja je pomeranje sa mikroskopskog modela predviđanja i upravljanja, koji može biti veoma kompleksan kod velikih saobraćajnih mreža, na makroskopski pristup kontrole i upravljanja saobraćajem. U istraživanjima je praćen uticaj promene vrednosti osnovnih parametara MFD metode kao što su akumulacija saobraćaja (prosečna gustina saobraćaja), produkcija saobraćaja (prosečna vrednost protoka na svim linkovima), ponderisana brzina itd. Lokacija meteorološke stanice uslovlila je izbor poteza ulične mreže na kojoj su istraživanja sprovedena. Saobraćajni pokazatelji su prikupljeni na saobraćajnicama oko centralne gradske zone grada Gvangdžoa. Prikupljeni su podaci o protoku saobraćaja (sa detektora na raskrsnicama kojima se upravlja pomoću SCATS sistema), brzini (na osnovi GPS podataka taksi službe) i gustini saobraćaja (kao odnos protoka i brzine). U cilju snimanja što realnijih podataka, u kontekstu neravnomernosti saobraćaja, nakon sedam dana od analize sprovedene sa kišnim danom realizovano je istraživanje i za dan bez padavina. Intenzitet kiše nije uzet u obzir. Procedura je ponovljena šest puta. Na osnovu dobijenih rezultata formirane su funkcije zavisnosti osnovnih praćenih pokazatelja pod uticajem suvog vremena i kiše. Rezultati istraživanja su pokazali da kiša ima negativan uticaj na kvalitet opsluge u saobraćajnom sistemu i da ga je moguće oceniti na makro nivou. Pokazano je da vrednost protoka saobraćaja raste do kritične vrednosti gustine. Za kišne vremenske uslove, vrednosti gustine i protoka

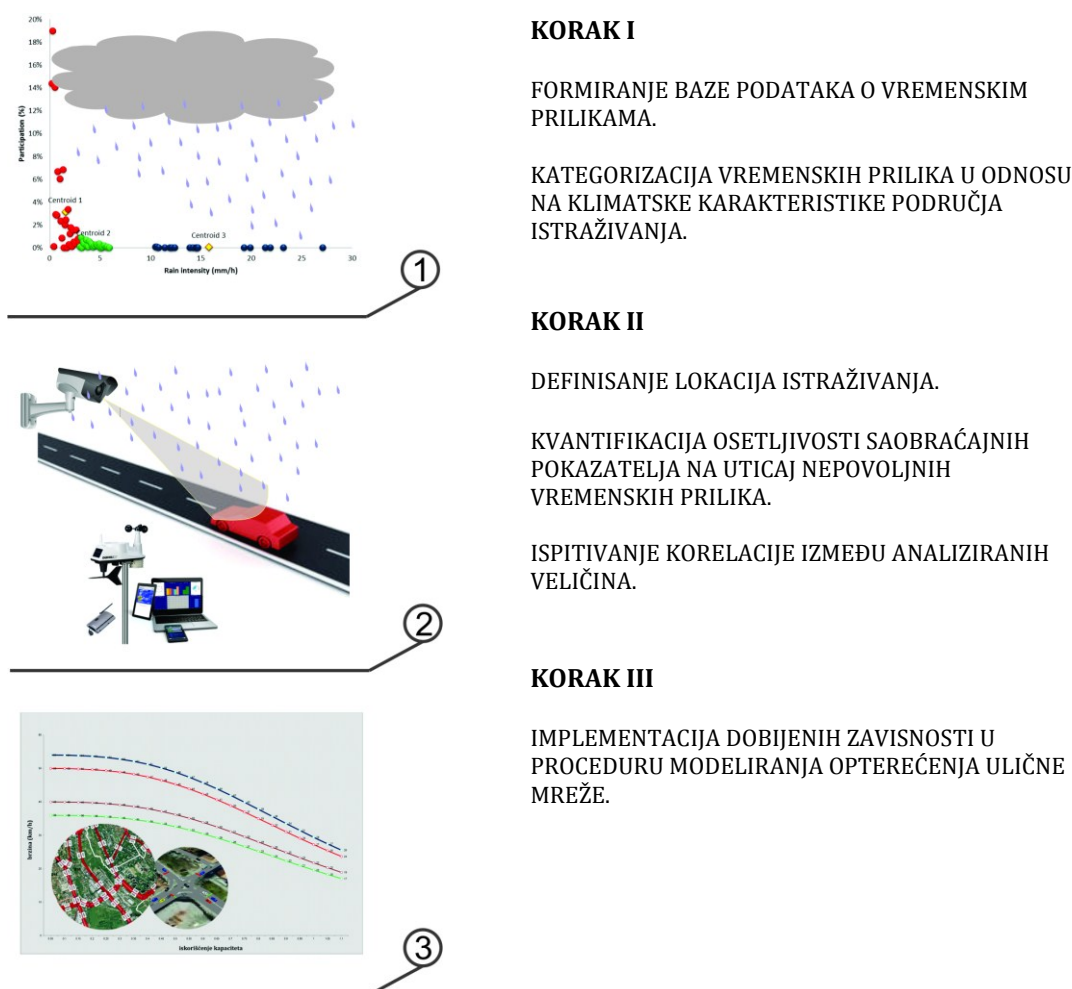
saobraćaja su redukovane. Zabeleženo prosečno smanjenje kritične gustine za vreme kišnih dana je oko 4.9%, dok se vrednost maksimalnog protoka saobraćaja smanjuje za oko 9.9%. Takođe su zabeležena smanjenja brzine slobodnog toka za oko 1.5%, a brzine pri kapacitetu za oko 4%. Dobijeni podaci pružaju podršku u definisanju osnovnih smernica delovanja na makro nivou sa ciljem redukovanja uticaja kiše.

Ovakva vrsta istraživanja delimično je uticala na uspostavljanje doktorske teze. Implementacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže na makro nivou nije direktno fokusirana na preventivno delovanje ili redukciju posledica uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem. Osnovna svrha disertacije je da pruži informaciju o tome u kolikoj meri nepovoljne vremenske prilike utiču na promene u ponudi saobraćajnog sistema, odnosno na stepen iskorišćenja kapaciteta ulične mreže, vreme putovanja i brzinu. Na taj način bi se omogućilo da se u procedure optimizacije kapaciteta ulične mreže i ispitivanje različitih scenarija razvoja saobraćajnog sistema uključi i osetljivost ponude saobraćajnog sistema na nepovoljne vremenske prilike.

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA UTICAJA NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA

Kvalitetno razrađena metodologija predstavlja možda i najvažniji preduslov za ostvarenje postavljenih ciljeva. U pogledu definisanja metodologije saobraćajnih istraživanja, vrlo je bitno temeljno definisati plan aktivnosti. Pošto je reč o dinamičkom sistemu važno je uzeti u obzir i okolnosti u kojima će se predložene aktivnosti realizovati. Predložena metodologija je definisana na takav način da potencijalne eksterne uticaje i ograničenja, koji su mogli da utiču na umanjene kvaliteta i značaja dobijenih rezultata, minimizira ili eliminiše.

Pojednostavljen prikaz koraka kojima je determinisan način ostvarenja postavljenih ciljeva predstavljen je na narednoj slici (Slika 5).



Slika 5 Koraci ka ostvarenju postavljenih ciljeva

Sa slike se vidi da izlazni rezultat prethodnog koraka predstavlja ulazni podatak za naredni korak. Iz navedih aktivnosti se vidi da je u Koraku I i Koraku II potrebno realizovati konkretna istraživanja, dok je u Koraku III reč o sintezi dobijenih rezultata kroz implementaciju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže.

U skladu sa definisanim ciljem disertacije, implementacija uticaja podrazumeva modifikaciju funkcije vremena putovanja. Priroda funkcije vremena putovanja uticala je na definisanje dva osnovna zadatka istraživanja (Korak II):

- ispitivanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika
- ispitivanje osetljivosti brzine kretanja vozila na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika

U odnosu na to, može se reći da je metodologija istraživanja koncipirana iz tri posebna, ali uzajamno povezana segmenta:

- formiranje baze podataka o vremenskim prilikama i kategorizacija istih
- ispitivanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika
- istraživanje osetljivosti brzine saobraćajnog toka na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika

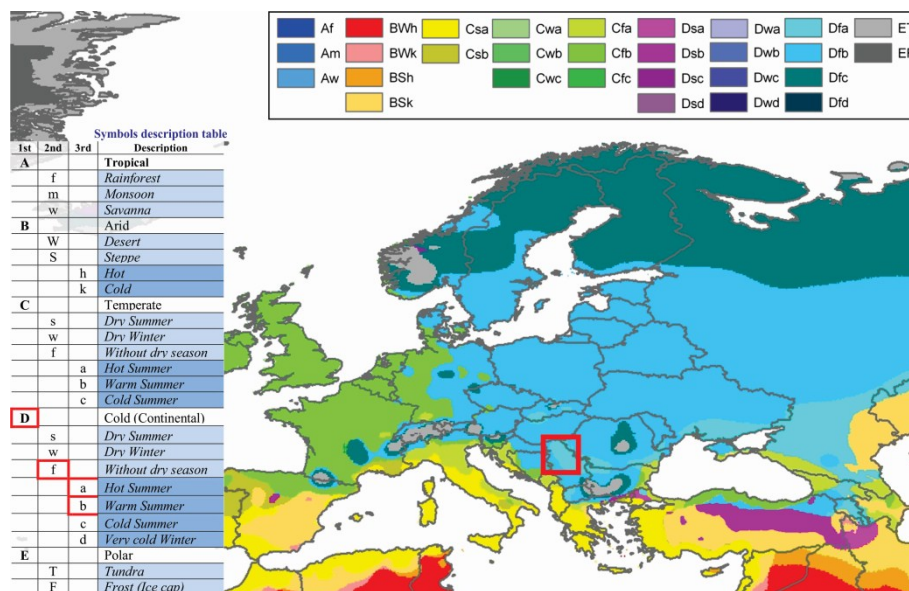
Za područje istraživanja je određen grad Beograd, kao reprezent urbanog gradskog područja sa jednim od najrazvijenijim saobraćajnih sistema u regionu. Velika gustina naseljenosti i jak intenzitet transportnih zahteva koji se realizuju u vršnim periodima, za posledicu imaju pojavu visokih vrednosti stepena iskorišćenja kapaciteta na najznačajnijim gradskim saobraćajnicama. Ova pojava posebno dolazi do izražaja za vreme nepovoljnih vremenskih prilika. Klimatske karakteristike i karakteristike saobraćajnog sistema grada preporučile su Beograd kao idealno područje za realizaciju istraživanja ove vrste.

4.1 METODOLOGIJA FORMIRANJA BAZE PODATAKA O VREMENSKIM PRILIKAMA

Kod istraživanja koja se odnose na analizu uticaja vremenskih prilika na saobraćajni sistem, treba imati u vidu da je reč o uspostavljanju korelacije između dinamičkih veličina. Prostorna i vremenska promenljivost vremenskih prilika u velikoj meri utiče na kompleksnost zadatka.

4.1.1. Klimatske karakteristike područja istraživanja

Područje istraživanja prema Köppen-Geiger klimatskoj klasifikaciji (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007). pripada pojasu umereno - kontinentalne klime (Slika 6). Iako je reč o umerenoj klimi, to ne podrazumeva konstantno umerene vrednosti klimatskih elemenata kroz vreme. Posmatrajući prosečne vrednosti temperature, količine padavina, i drugih klimatskih elemenata, na mesečnom ili godišnjem nivou, one opisuju umerenu klimu. Međutim, na nivou manjih vremenskih intervala kao što je dan oscilacije svakako postoje.



Slika 6 Klimatska zona istraživanog područja (Peel et al., 2007)

Ljudski faktor može da utiče na promenu klimatskih karakteristika, što je posebno izraženo u gusto naseljenim urbanim celinama. Gradska klima je promer lokalne modifikacije vremena koja je nastala delatnošću ljudi. Meteorološka i fizičko-hemijska merenja u mnogim svetskim urbanim centrima ukazuju da je zbog uticaja

urbanizacije došlo do promene lokalnih i mikroklimatskih uslova u gradovima, u odnosu na njihovu okolinu, što se naročito ogleda u poslednjih nekoliko decenija (Unkašević, 1994). Ove promene uslovljavaju (Unkašević, 1994):

- poremećena prirodna ravnoteža zračenja, jer je vegetacija zamenjena visokim površinama sagrađenih od betona i cigli;
- visoke građevine, koje su prepreke vetru pa menjaju prirodno strujanje i turbulenciju vazduha;
- poremećena ravnoteža vodene pare, jer su relativno vlažne površine zamenjene suvim, i
- emisija toplote, vodene pare i zagađujućih materija iz gradskih izvora u atmosferu.

Iz aspekta klimatskih karakteristika grada Beograda veoma je značajan i uticaj reljefa. Beograd je sa severne strane opasan Panonskom nizijom, dok se sa južne strane nalazi brdovita Šumadija. Takođe ne bi trebalo zanemariti ni uticaj dve reke, Save i Dunava, koje praktično seku centralno područje grada (Unkašević, 1994).

Može se reći da Beograd karakterišu topla leta i umereno hladne zime. Prelazni periodi jesen i proleće postoje, ali je njihovo trajanje kraće u odnosu na leto i zimu. Ipak, na osnovu praćenja trenda meteoroloških podataka, može se zaključiti da je leto kao godišnje doba na ovom području postojanije i dugotrajnije godišnje doba u odnosu na zimu.

Za karakteristike osnovnih klimatskih parametara (temperature i padavina) područja istraživanja korišćena su dva izvora podataka: Ekološki atlas Beograda (u daljem testu *Izvor 1*) i podaci sa internet sajta <http://meteoplaneta.rs> (u daljem testu *Izvor 2*). Upoređujući podatke iz oba izvora ne postoje značajne razlike u prezentovanim veličinama, ali obuhvataju različite vremenske horizonte. U Ekološkom atlasu Beograda pojedine baze podataka se odnose na period od 1961. do 1990. godine, a pojedine baze podataka prezentovane na pomenutom internet sajtu odnose se na vremenski horizont od 1800. do 2007. godine.

S obzirom da će za potrebe istraživanja biti korišćeni precizni podaci, kao rezultat direktnih merenja, podaci iz navedenih izvora poslužiće u svrhu opšteg prikaza klimatskih karakteristika područja istraživanja.

Opšte temperaturne karakteristike područja istraživanja

Srednja godišnja temperatura vazduha u Beogradu kreće se oko 12°C (na osnovu oba izvora navedena u prethodnom tekstu). U narednoj tabeli date su prosečne vrednosti zabeleženih temperatura po mesecima (Tabela 30).

Tabela 30 Prosečne temperature po mesecima

Srednja temperature vazduha (°C)													
Meseci	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prosek
Izvor 1	0.4	2.8	7.2	12.4	17.2	20.1	21.8	21.4	17.7	12.5	7.0	2.3	11.9
Izvor 2	-0.3	1.6	6.2	12.1	17.3	20.5	22.5	21.8	17.8	12.5	6.4	1.7	11.7

Najveća razlika u zabeleženim maksimalnim i minimalnim temperaturama tokom meseci zabeležena je u mesecu januaru, i iznosi 41.3°C. U tabeli 31 predstavljene su apsolutno maksimalne i minimalne izmerene temperature vazduha po mesecima, praćene tokom pomenutih perioda.

Tabela 31 Apsolutno maksimalne i minimalne izmerene temperature vazduha (Gradski zavod za zaštitu zdravlja Beograd, 2002)

Meseci	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aps. maks. temp. (°C)	20.3	23.1	28.9	29.9	34.1	35.7	40.2	38.7	35.3	29.3	28.4	22.6
Aps. min. temp. (°C)	-21	-15.4	-12.4	-1.9	1.6	4.6	9.3	6.7	0.6	-2.6	-8	-15.1

Apsolutno zabeležena najveća temperatura od 40.2°C je registrovana u julu dok je najniža temperatura zabeležena u januaru i iznosi -21°C. Ova dva meseca predstavljaju i reprezentive prosečno najtoplijeg i najhladnijeg meseca u toku godine. Kada se analiziraju mesečni kvartali koji odgovaraju godišnjim dobima, na nivou prosečnih vrednosti period od septembra do novembra je topliji u odnosu na period od marta do maja (Izvor 2) (Tabela 32).

Tabela 32 Prosečne temperature vazduha po godišnjim dobima

	Dec – Feb	Mart – Maj	Jun – Avgust	Sept – Nov
Srednja temperatura vazduha (°C)	1	11.8	21.6	12.2

Kada je reč o danima sa temperaturom iznad 30°C u proseku ih godišnje bude oko 31, a najveći procenat beleži se tokom jula i avgusta.

Opšte karakteristike padavina na području istraživanja

Imajući u vidu karakteristike istraživanja i da je reč o urbanoj gradskoj sredini, akcenat će biti stavljen na dva najprepoznatljivija oblika padavina iz oblaka, na kišu i sneg. Osnovne karakteristike ovih oblika padavina preuzete su iz knjige Meteorologija (1990).

Na području istraživanja kiša je najčešći oblik padavina iz oblaka. "Prvobitno stvorene sitne vodene kapljice u oblaku rastu putem koagulacije i kada im prečnik postane veći od 0.12 mm one počnu da padaju prema zemlji. Najveće kišne kapljice ne mogu biti teže od 0.2 grama, što odgovara prečniku od 7 mm. Veće kapi se pri svome padanju raspadnu u sitnije sa maksimalnom težinom od 0.2 grama. Najveća brzina padanja kapljica, koje imaju prečnik od 5 mm, iznosi 8 m/s. Ustanovljeno je da se kišne kapi luče iz oblaka tek ako oblak ima debljinu oko 700m. Tada kiša počinje da sipi, a kada oblaci postanu deblji od 1500 m, onda iz njih pada kiša", (Milosavljević, 1990).

"Sneg se obrazuje u slučaju kada se vazduh zasiti vodenom parom na temperature ispod 0°C, odnosno na temperature nižoj od -12°C. Tada vodena para sublimira, odnosno prelazi odmah u čvrsto stanje. Ako je sublimacija spora i postepena, ledene čestice dobijaju manje-više pravilne kristalne oblike iz kojih je sastavljen sneg. Na umerenim širinama sneg najčešće pada na temperaturama između -2 i +2°C", (Milosavljević, 1990).

Srednje godišnje količine padavina na području Beograda kreću se u intervalu od 610 do 730 mm. Prosečna godišnja količina padavina iznosi 684.3 mm (Izvor 1), a najveće količine padavina javljaju se tokom maja i juna (Tabela 33).

Tabela 33 Prosečna količina padavina po mesecima

Pros. god. količina padavina (mm)													
Meseci	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Suma
Izvor 1	49.3	44.4	49.5	58.8	70.7	90.4	66.5	51.2	51.4	40.3	54.3	57.5	684.3
Izvor 2	42.2	37.6	44.2	55.7	72.7	87.2	64.1	57.3	54.0	53.6	56.8	51.9	679.9

Iz tabele se vidi da postoje oscilacije u zabeleženim prosečnim vrednostima količine padavina u pojedinim mesecima. Ove razlike se mogu pripisati različitim

vremenskim horizontima baza prikupljenih podataka. Uglavnom, kada je reč o sumi prosečnih vrednosti na godišnjem nivou razlika je zanemarljiva.

Prosečan broj dana sa padavinama u toku godine je oko 139 (odnosno 38%), od čega je u proseku 33.7 dana sa snegom (9.2%), koji su raspoređeni od oktobra do maja (Tabela 34). Od ukupnog broja dana sa padavinama, broj dana sa intenzitetom padavina većim od 10 mm ima učešće od 14.7%. Važno je napomenuti da je broj dana sa snegom poslednjih godina u opadanju.

Tabela 34 Prosečan broj dana sa padavinama na teritoriji grada Beograda

Mesec	Prosečan broj dana sa padavinama $\geq 1\text{mm}$	Prosečan broj dana sa padavinama $\geq 10\text{mm}$	Broj dana sa snegom	Broj dana sa snežnim pokrivačem	*Broj dana sa snežnim pokrivačem (visina $>1\text{cm}$)
Jan	13.3	1.7	10.5	15.5	13.7
Feb	12.2	1.1	7.5	10.1	9.8
Mar	11.8	1.4	4.3	3.8	3.7
Apr	12.7	1.8	0.4	0.1	0.1
Maj	13.5	2.2	-	-	-
Jun	13.8	3	-	-	-
Jul	9.9	1.9	-	-	-
Avg	8.9	1.4	-	-	-
Sep	9	1.4	-	-	-
Okt	8.2	1.4	0.2	0.1	0
Nov	12.1	1.7	2.5	2.4	1.8
Dec	13.7	1.5	8.3	10.7	8.6
Godišnje	139.1	20.5	33.7	42.7	37.8

**ovaj podatak je za razliku od ostalih prezentovan iz Izvora 2*

Podaci o karakteristikama vremenskih prilika u periodu istraživanja

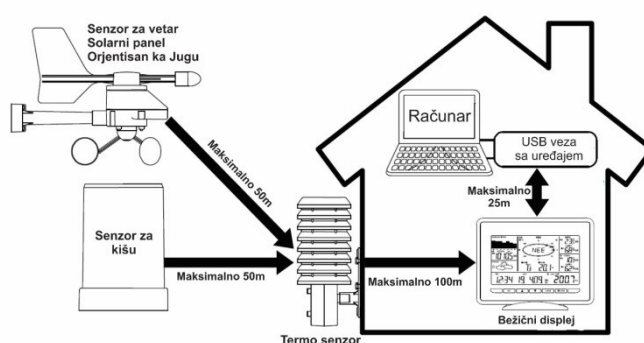
Pored prikazanih opštih karakteristika vremenskih prilika, u cilju većeg nivoa preciznosti i pouzdanosti meteoroloških podataka na području istraživanja, podaci o karakteristikama vremenskih prilika za potrebe konkretnog istraživanja su prikupljeni sa posebnog izvora. U tu svrhu korišćena je automatska meteorološka stanica (AMS) TFA Primus. Ovaj model je izrađen po uzoru na meteorološku stanicu američkog proizvođača La Crosse WS-2800 i identičnih je karakteristika. Na slici 7 prikazana je lokacije AMS u odnosu na analizirano područje.



Slika 7 Pozicija AMS u odnosu na analizirano područje

Pored AMS, čija je lokacija prikazana na slici, u centralnoj zoni grada postoji i meteorološka stanica Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ). U periodu realizacije istraživanja, podaci iz RHMZ-a nisu bili dostupni na nivou odgovarajućih vremenskih intervala, odnosno u zimskom periodu, od oktobra do aprila, automatska meteorološka stanica RHMZ-a nije u funkciji i tokom tog perioda podaci se beleže metodom osmatrača.

Mikrolokacija AMS je morala da bude takva da ispunjava standarde i propise proizvođača u cilju obezbeđivanja podataka odgovarajućeg kvaliteta (Slika 8).



Slika 8 Kriterijumi za definisanje mikrolokacije AMS

AMS je beležila podatke o spoljnoj temperaturi vazduha, vlažnosti vazduha, brzini vetra, intenzitetu padavina i vazдушnom pritisku. Iz naredne tabele se mogu videti tolerancije odstupanja u zabeleženim podacima koje su garantovane od strane

proizvođača. Pored tolerancija navedeni su i vremenski intervali beleženja podataka (Tabela 35).

Tabela 35 Tehničke karakteristike AMS

Spoljna temperatura	-40 °C to +59 °C sa preciznošću od 0.1 °C
Vlažnost vazduha	1% to 99% sa preciznošću od 1%
Brzina vetra	od 0 do 50 m/s sa preciznošću od 0.1m/s
Intenzitet kiše	od 0 do 9999.9mm
Vazdušni pritisak	od 920 do 1080 hpa
Način beleženja podataka	Temperatura i vlažnost na svakih 13 sekundi
	Brzina vetra na svakih 17 sekundi
	Intenzitet kiše na svakih 19 sekundi
	Vazdušni pritisak na svakih 15 sekundi

Izlazni oblik generisanih podataka u pogledu intervala merenja (1 min, 15 min, 1 h) može da se podešava u zavisnosti od zahteva korisnika. Podaci o padavinama su akumulirani na nivou dana, meseca i godine (Slika 9)

1	day	month	year	hour	minute	temperature	humidity	dewpoint	barometer	windspeed	gustspeed	direction	rainlastmin	dailyrain	monthlyrain	yearlyrain	heatindex
2	1	1	2013	0	0	-3.5	91	-4.8	1025.1	3.4	4.7	122	0	0	0	0	-3.5
3	1	1	2013	0	1	-3.5	91	-4.8	1025.1	2.4	4.7	131	0	0	0	0	-3.5
4	1	1	2013	0	2	-3.5	91	-4.8	1025	2.8	4.7	125	0	0	0	0	-3.5
5	1	1	2013	0	3	-3.5	91	-4.8	1025	2.5	4.7	134	0	0	0	0	-3.5
6	1	1	2013	0	4	-3.5	91	-4.8	1025	2.8	4.7	114	0	0	0	0	-3.5
7	1	1	2013	0	5	-3.5	91	-4.8	1024.9	2	4.7	129	0	0	0	0	-3.5
8	1	1	2013	0	6	-3.5	91	-4.8	1024.9	3	4.7	123	0	0	0	0	-3.5
9	1	1	2013	0	7	-3.5	91	-4.8	1024.9	2.9	4.7	131	0	0	0	0	-3.5
10	1	1	2013	0	8	-3.5	91	-4.8	1024.9	2.7	4.7	120	0	0	0	0	-3.5

Slika 9 Izlazni oblik podataka iz AMS

Na osnovu navedenih karakteristika AMS je ispunjavala neophodne kriterijume za realizaciju konkretnog istraživanja.

Meteorološki podaci su prikupljeni u periodu od četiri godine, odnosno od 2012. do 2015. godine. Ovaj period svakako nije reprezentativan za donošenje zaključaka o indicijama vezanim za trend promene karakteristika vremenskih prilika, ali pruža precizniji uvid u karakteristike vremenskih prilika na analiziranom području.

Iako je tokom analiziranog perioda zabeležen širok spektar pojave vremenskih prilika različitih karakteristika, u konkretnom istraživanju akcenat analize uticaja je stavljen na padavine, prvenstveno na kišu, iz nekoliko razloga:

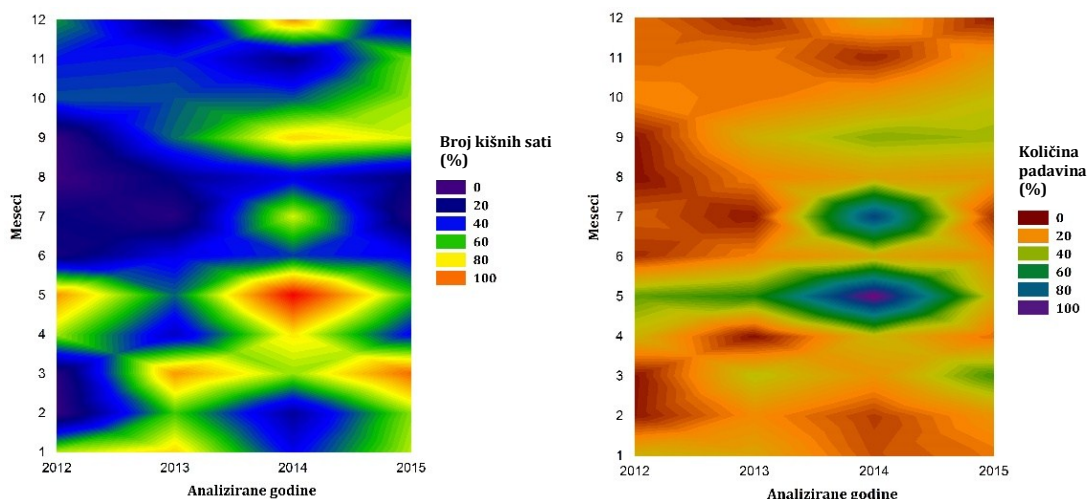
- Na osnovu prikupljenih podataka utvrđeno je da u klimatskim karakteristikama analiziranog područja, iz aspekta nepovoljnih vremenskih

prilika najveće učešće uzimaju padavine, tačnije kiša. Jedan od ciljeva disertacije predstavlja implementacija faktora uticaja nepovoljnih vremenskih prilika karakterističnih za područje istraživanja u proceduru modeliranja saobraćajnog opterećenja. Pošto se u praksi veoma retko modeliraju ekstremni scenariji, odnosno scenariji sa veoma malom verovatnoćom pojave, u obzir je uzeta i zastupljenost nepovoljnih vremenskih prilika na analiziranom području.

- Kroz pregled literature utvrđeno je da je u najvećoj meri istraživani uticaj padavina na parametre saobraćajnog toka, ocenjujući padavine kao najznačajniji oblik uticaja vremenskih prilika na saobraćajni sistem.
- Magla, led i bljuzgavica na kolovozu takođe predstavljaju elemente nepovoljnih vremenskih prilika atipične za istraživano područje. Magla kao retka pojava na području istraživanja, i zbog svoje prostorne i vremenske promenljivosti, u skladu sa pomenutim ciljem disertacije nije podrazumevana kao prioritetan element nepovoljnih vremenskih prilika za analizu. Prethodna istraživanja koja su uzimala u obzir analizu uticaja magle na karakteristike saobraćajnog toka uglavnom su realizovana na vangradskoj putnoj mreži. Led i bljuzgavica predstavljaju pojave kojima se u urbanoj sredini prevencijom i adekvatnim reagovanjem onemogućava postojanost. Samim tim, neophodnost njihove estimacije uticaja za potrebe modeliranja opterećenja ulične mreže se umanjuje.
- Kada je reč o temperaturi, prethodna istraživanja su pokazala da uticaj temperature na elemente ponude transportnog sistema postoji, ali da značajnije vrednosti ostvaruje na ekstremno niskim temperaturama (<-20°C) (Agarwal et al., 2005). Imajući u vidu da je reč o podneblju sa umereno kontinentalnom klimom, mali broj zabeleženih dana sa ekstremno niskom temperaturom nije opravdavao uzimanje ovog elementa u obzir. Broj dana sa ekstremno visokim temperaturama je nešto veći ali se one beleže tokom leta kada opterećenost saobraćajne mreže nije merodavna. Istraživanja ove vrste bi, pored spoljnog uticaja visokih temperatura, trebala da uzmu u obzir i postojanost klima uređaja u vozilima kao i uticaj

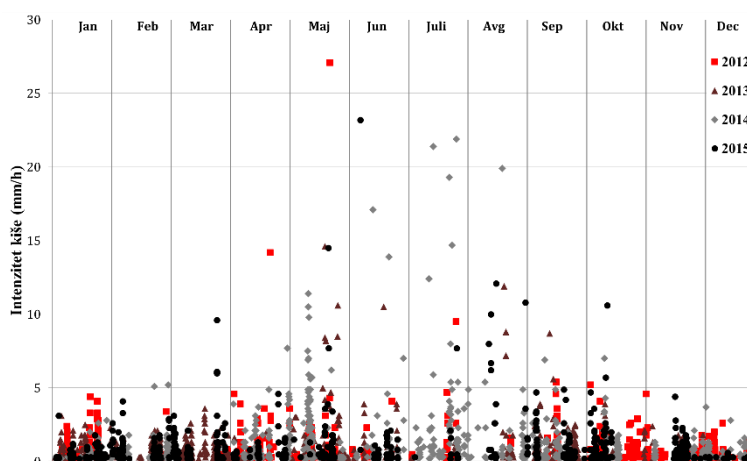
klimatizacije u vozilu na ponašanje vozača što bi zahtevalo posebna istraživanja.

Podaci o intenzitetu kiše su prikupljeni na nivou jednogminutnih intervala, ali su za potrebe istraživanja podaci ekspanzirani na nivo od jednog sata. Za period od četiri analizirane godine ukupno je zabeleženo 2063 časova sa kišom različitog intenziteta što je negde oko 5.8% od ukupnog broja časova. Pod kišnim časom su u ovom kontekstu podrazumevani časovi u okviru kojih je, makar u jednom trenutku tokom časa, identifikovana kiša. Kao meseci sa najvećom količinom kiše izdvajaju se maj i septembar. Izuzetak predstavlja mesec juli 2014. godine sa izmerenom natprosečnom količinom padavina za taj mesec. Inače 2014. godina je, u okviru analiziranog perioda, specifična, kada je reč o zabeleženim količinama padavina. Snažan ciklon i velike količine padavina, tokom meseca maja prouzrokovale su i izlivanje reka iz rečnih korita i prouzrokovale poplave na Balkanskom poluostrvu. Na predstavljenim grafikonima jasno je uočljivo da su tokom maja 2014. godine zabeležene najveće količine padavina (Grafik 1a i Grafik 1b). Takođe, u tom periodu je zabeležen i najveći broj kišnih sati u kontinuitetu. Važno je napomenuti da količina padavina nije uvek u direktnoj korelaciji sa brojem kišnih sati. Sa grafika se može uočiti da je recimo tokom 2012. godine u mesecu maju takođe zabeležen značajan broj kišnih sati, ali koji nije bio praćen velikom količinom padavina. Rezultati prikazani na grafikonima su dati na mesečnom nivou, pa učešće kratkotrajnih padavina jakog intenziteta koje su karakteristične tokom letnje sezone nije uočljivo.



Grafik 1 Broj kišnih sati (a) i količina padavina (b)

U pogledu zabeleženih intenziteta padavina, u skladu sa klimatskim karakteristikama područja istraživanja, najveće učešće uzima kiša slabijeg intenziteta. Na grafiku su predstavljeni intenziteti kiše na časovnom nivou za analizirani period od četiri godine (Grafik 2). Kiša jačeg intenziteta je karakteristična za letnje mesece. Tokom meseca maja, juna, jula i avgusta zabeležene su najveće vrednosti časovnog intenziteta kiše. Analizirajući grafik može se primetiti da u toku posmatranog perioda praktično ne postoji mesec bez pojave kiše, makar u toku jednog sata.



Grafik 2 Intenziteti kiše na časovnom nivou

Snežne padavine po učestanosti svrstavaju se u drugu kategoriju zastupljenih padavina na ovom prostoru, odmah iza kiše. Iako su po zastupljenosti na drugom mestu njihovo učešće je daleko manje u odnosu na kišu. Na automatskoj mernoj

stanici intenzitet snega je takođe meren pluviometrom, kao i kiša, i izražavan je u mm/h. Pored toga, beležena je i visina snežnog pokrivača. Iako na osnovu istorijskih podataka prosečan broj dana u kojima dođe do padanja snega varira od 27 do 33, u periodu od analizirane četiri godine prosečan godišnji broj dana sa padanjem snega bio je manji za oko 50%. Naravno da je usled zadržavanja snega broj dana sa snežnim pokrivačem bio veći, ali pošto je reč o gradskim uslovima u kojima se saobraćajnice uglavnom čiste od snega veoma brzo, ovaj podatak za predmetnu analizu nije bio od značaja.

Za potrebe istraživanja nije zabeleženo dovoljno časova sa različitim intenzitetima snežnih padavina kako bi se jasno formirale kategorije, odnosno, kako bi postojala mogućnost donošenja zaključaka o promenama u realizaciji saobraćajnog procesa. Ipak, jedna kategorija vremenskih uslova, vezanih za uticaj snega na saobraćajni sistem obuhvaćena je analizom. Dobrom organizacijom istraživanja, u nekoliko navrata, snimljen je odgovarajući broj podataka za uslove snežnih padavina uz bljuzgavicu na kolovozu. U tim periodima, nažalost, službe za održavanje saobraćajnica nisu adekvatno reagovala, pa je bilo prilike da se analiziraju promene pojedinih parametara saobraćajnog toka u ovim uslovima.

4.1.2. Kategorizacija padavina

Kao bazni oblik nepovoljnih vremenskih prilika, u skladu sa klimatskim karakteristikama područja istraživanja, identifikovana je kiša. Vrednosti zabeleženih intenziteta kiše na časovnom nivou iskorišćene su u svrhu formiranja kategorija kiše.

U početnim fazama ispitivanja uticaja vremenskih prilika na parametre saobraćajnog toka, uglavnom je istraživana razlika između suvog vremena i uticaja nekog od oblika nepovoljnih vremenskih prilika, na primer kiše ili snega, pri tome ne vodeći posebno računa o intenzitetima kiše ili snega. U kasnijim istraživanjima, uticaji su počeli detaljnije da se analiziraju i kategorišu. Kategorizacija uticaja uglavnom je povezivana sa intenzitetom delovanja analiziranog oblika nepovoljne vremenske prilike.

U literaturi je zabeleženo da su u analizama uticaja kiše primenjene različite kategorizacije kiše u odnosu na intenzitet (Asamer & Van Zuylen, 2012; Highway capacity manual, 2010; Wang et al., 2006). S obzirom da se karakteristike vremenskih prilika razlikuju za različita područja, odlučeno je, da se za svrhe ovog istraživanja kategorizacija kiše izvrši u odnosu na karakteristike lokalnih klimatskih uslova. Na osnovu četvorogodišnjih podataka o intenzitetu kiše, u cilju definisanja kategorija kiše karakteristične za područje istraživanja, pored intenziteta, praćena je i zastupljenost pojave u okviru analiziranog perioda. Upravo su ova dva kriterijuma predstavljala osnov za primenjenu kategorizaciju. U odnosu na iskustva prethodnih istraživanja (Highway capacity manual, 2010; Smith et al., 2004) za potrebe istraživanja izvršena je kategorizacija kiše na tri kategorije koje su formirane primenom K-means metode (Hartigan, 1975). K-means metoda je realizovana korišćenjem softverskog paketa IBM SPSS Statistics 20.

Svaka pojava kiše na časovnom nivou predstavljena je kao element koordinatnog sistema, gde su koordinate svakog elementa intenzitet kiše i zastupljenost kiše tog intenziteta (na primer, učešće kiše intenziteta 0.5 mm/h je u okviru analiziranog uzorka zastupljeno sa 14.06%). K-means predstavlja statističku metodu za utvrđivanje relativno homogenih grupa elemenata. Sličnost elemenata se utvrđuje na osnovu rastojanja, odnosno što se elementi nalaze na manjem međusobnom rastojanju njihova sličnost je veća. Za proračun rastojanja između elemenata korišćena je Euklidska udaljenost. Matematička formulacija K-means klasterovanja bazirana je na minimizaciji funkcije kvadratne greške:

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2$$

J – kriterijumska funkcija koju treba minimizirati

k – ukupan broj klastera

n – ukupan broj elemenata

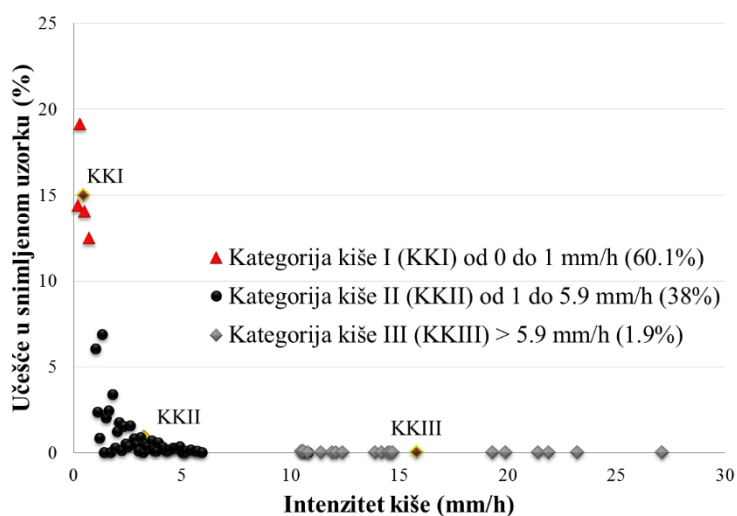
c_j – centar klastera j

x_i – i -ti element klastera j

U konkretnom slučaju, K-means algoritam je grupisao n elemenata u tri klastera, u okviru kojih svaki element pripada klasteru čiji je centar najbliži posmatranom elementu. Centar se pozicionira tako da se minimizira rastojanje elemenata pripadajućeg klastera od centra. Nakon svake završene iteracije, proverava se optimalnost pozicije centara (proverom srednjih vrednosti rastojanja). U slučaju definisanja novih lokacija centara klastera vrši se pregrupisanje elemenata u cilju ispitivanja mogućnosti kvalitetnije raspodele elemenata po klasterima. Iterativni postupak traje dok se suma ukupnih rastojanja elemenata od definisanih centara ne minimizira.

U okviru metode, definisana su i ograničenja koja omogućavaju da svaki element pripada samo jednom klasteru, i da svaki od analiziranih elemenata mora biti dodeljen nekom klasteru.

Preveliki broj klastera vezanih za kategorije kiše znatno bi uticao na kompleksnost preciznog merenja promene vrednosti saobraćajnih pokazatelja, tačno u okviru granica definisanih kategorija. Rezultat primenjene metode prikazan je na narednom grafiku (Grafik 3). Na grafiku se vidi na koji način su elementi, slični po intenzitetu i zastupljenosti grupisani, formirajući pri tome tri kategorije kiše. Pored intenziteta kiše, za svaku od kategorija predstavljena je i ukupna zastupljenost kiše tog intenziteta iskazana u procentima.



Grafik 3 Kategorizacija kiše

Za validaciju klasterovanih podataka primenjen je metod "Silhouette" koji ukazuje na kvalitet definisanih klastera. Izlazni rezultati validacije ovom metodom se kreću u opsegu od 1 (za dobro grupisane elemente klastera) do -1 (za loše grupisane elemente klastera). Dobijena vrednost od 0.73 ide u korist potvrde dobro grupisanih elemenata klastera.

Kako se vidi sa grafika, zastupljenost elemenata iz kategorije KKIII je veoma mala i kreće se od 0.1% za intenzitet kiše od 10.5mm/h do 0.05% za intenzitet kiše od 27.1mm/h. Imajući u vidu dobijene rezultate, dalja istraživanja, kada je reč o kiši, su bazirana na analizi uticaja prve dve kategorije kiše (KKI i KKII).

Kako bi saobraćajni parametri bili testirani pod uticajem vremenskih prilika koje su karakteristične za područje istraživanja, u kategorizaciji je, pored intenziteta, važnu ulogu imala i zastupljenost pojave. Zato nazivi kategorija nisu vezani samo za intenzitet, kao što je to uglavnom bio slučaj u prethodnim istraživanjima gde je kategorizacija kiše bila opisana kao kiša slabog, srednjeg i jakog intenziteta. Imajući u vidu svrhu istraživanja, cilj je kvantifikacija promena u vrednostima parametara saobraćajnog toka pod uticajem najučestalijih oblika nepovoljnih vremenskih prilika.

Sa grafika se uočava razlika u opsegu definisanih kategorija. Vrlo je moguće da bi na osnovu značajno veće baze podataka o intenzitetu padavina kojima raspolaže RHMZ, kategorizacija padavina imala drugačiji oblik. Možda bi klase bile ravnomernijeg opsega i definisane sa većim nivoom preciznosti. Međutim, i prezentovana kategorizacija omogućava ispitivanje postavljenih hipoteza, što za inicijalna istraživanja ove tematike, na analiziranom području, predstavlja dovoljan preduslov. Kod konkretnih istraživanja u prvi plan je stavljena različitost vremenskih prilika pod kojima su istraživane promene u parametrima saobraćajnog toka, a ne nivo preciznosti podataka dobijen sa AMS. S obzirom da su sva istraživanja, ili realizovana terenski ili uz pomoć video zapisa, omogućavala je dodatnu potvrdu različitosti vremenskih prilika vizuelnom ocenom. Sa druge strane, postavljanje širokih opsega u definisanju kategorija povećava verovatnoću pojave velikih disperzija rezultata istraživanja u okviru iste analizirane kategorije

vremenskih prilika. U procesu realizacije istraživanja i analize rezultata na tu činjenicu je obraćena posebna pažnja.

U prethodnom tekstu je navedeno da će pored kiše biti analiziran i uticaj snežnih padavina u kombinaciji sa bljuzgavicom na kolovozu na parametre saobraćajnog toka. Ova pojava se ne može opisati kao karakteristična za područje istraživanja imajući u vidu dve činjenice:

1. broj snežnih dana poslednjih godina je u opadanju
2. područje istraživanja je gradska urbana sredina, u kojoj se ova pojava u određenoj meri može pripisati neažurnosti službe za održavanje saobraćajnica, što ne bi trebalo da bude slučaj.

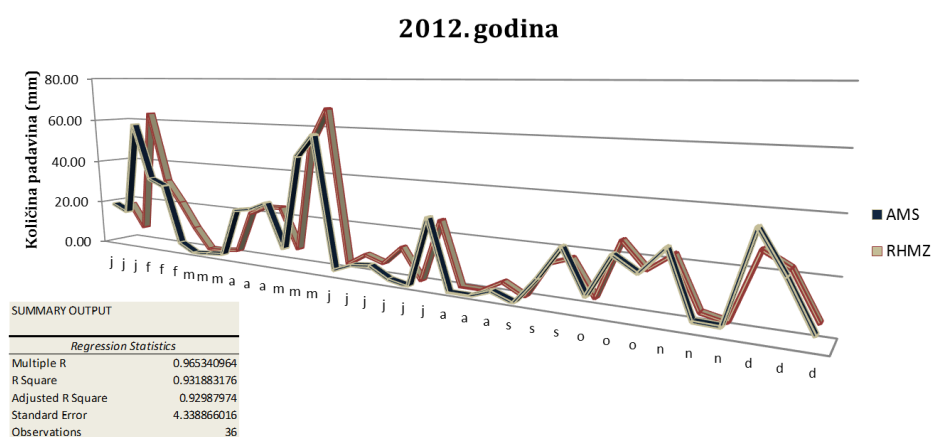
Imajući u vidu da su istraživanja realizovana i u pomenutim vremenskim prilikama, kao treća kategorija za analizu uticaja na parametre saobraćajnog toka definisan je i sneg sa bljuzgavicom (SSB).

Promene u vrednosti istraživanih parametara tokom definisanih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika su poređene u odnosu na vrednosti parametara u idealnim vremenskim prilikama (IVP). IVP su u okviru istraživanja podrazumevale suv kolovoz, bez padavina, dobar nivo vidljivosti (preko 400m) i temperaturu između 9 i 16°C.

Uporedna analiza podataka AMS i podataka iz RHMZ

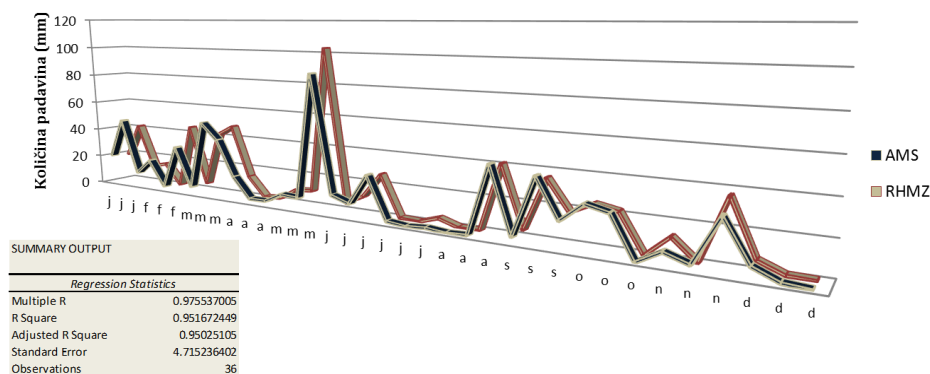
Usled nemogućnosti dobijanja podataka na odgovarajućim vremenskim intervalima iz meteorološke stanice RHMZ-a izvršeno je poređenje podataka dobijenih sa AMS i zvaničnih godišnjih meteoroloških izveštaja o klimatološkim podacima. Osnovni kriterijum, koji je morao da bude ispunjen kada je reč o beleženju podataka o vremenskim prilikama, je merodavnost zabeleženih podataka na analiziranim lokacijama. Kao što je pomenuto, olakšavajuća okolnost u proceni intenziteta padavina je što su tokom saobraćajnih istraživanja na definisanim lokacijama korišćeni ili video zapisi ili neposredno osmatranje, čime je eliminisana pojava neprihvatljivih odstupanja u proceni intenziteta.

I pored toga što kvalitet AMS i tolerancije definisane od strane proizvođača garantuju odgovarajući nivo preciznosti, izvršeno je i upoređivanje dobijenih podataka tokom analiziranog perioda sa zvaničnim podacima RHMZ-a. Klimatološka merenja i osmatranja na mernim stanicama RHMZ-a sprovedena su u tri termina, u 7h, 14h i 21h po lokalnom vremenu. Izmerene dnevne visine padavina odnosile su se na period od 24 sata: od 7 sati prethodnog dana do 7 sati tekućeg dana kada su se registrovale. Na osnovu dostupnosti podataka klimatoloških godišnjaka poređenja su realizovana za tri godine 2012., 2013. i 2014. godinu. Klimatološki godišnjak za 2015. godinu u trenutku izrade disertacije nije bio dostupan. Poređenje podataka o količini kiše je vršeno na nivou 10 dana, odnosno jedne trećine meseca. Za poređenje podataka dobijenih sa dva izvora korišćena je regresiona analiza. Na ovaj način nije bilo moguće utvrditi nivo poklapanja rezultata dobijenih sa ova dva izvora na nivou časovnih intenziteta, već su poređeni trendovi promena. Prema očekivanjima zabeležena su i odstupanja u snimljenim podacima koja su prouzrokovana promenljivošću prostorne i vremenske komponente kiše i prostorne dislociranosti izvora prikupljanja podataka. I pored toga, dobijeni su sasvim zadovoljavajući rezultati kada je reč o zabeleženim kumulativnim količinama kiše na desetodnevnom nivou u periodu od godinu dana (Grafik 4, Grafik 5 i Grafik 6).



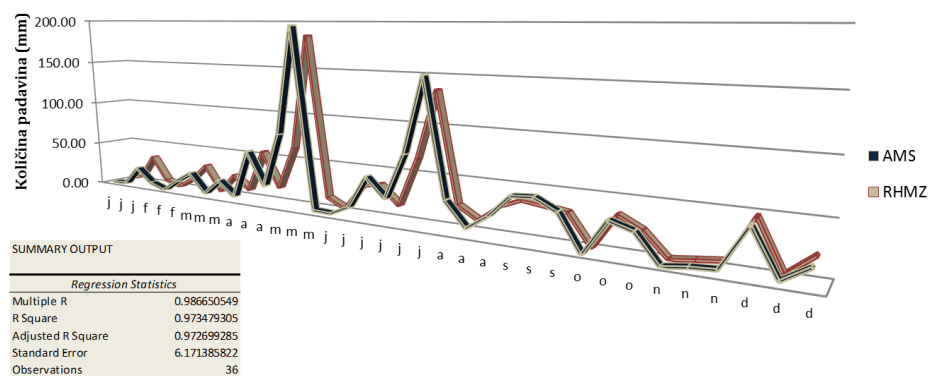
Grafik 4 Uporedna analiza podataka između AMS i RHMZ (2012)

2013. godina



Grafik 5 Uporedna analiza podataka između AMS i RHMZ (2013)

2014. godina



Grafik 6 Uporedna analiza podataka između AMS i RHMZ (2014)

U sva tri analizirana slučaja dobijena je jako visoka vrednost koeficijenta determinacije koja ukazuje na dobru korelaciju dve baze podataka. Po analiziranim godinama, koeficijent determinacije je za 2012., 2013. i 2014. godinu iznosio 0.93, 0.95 i 0.97, respektivno.

Kao predmet istraživanja definisano je ispitivanje osetljivosti elemenata transportne ponude u odnosu na definisane kategorije nepovoljnih vremenskih prilika. Istraživanje je podeljeno na dva segmenta, od kojih se prvi segment bazirao na istraživanju osetljivosti kapaciteta ulične mreže na nepovoljne vremenske prilike, dok se drugi segment bazirao na ispitivanju osetljivosti brzine saobraćajnog toka na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika.

4.2 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA OSETLJIVOSTI KAPACITETA ULIČNE MREŽE NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA

Kako je rečeno u opisu problematike tretirane disertacijom, jedan od pravaca istraživanja predstavlja ispitivanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. Kapacitet ulične mreže predstavlja jedan od osnovnih elemenata ponude transportnog sistema i može se prosmatrati kroz dva segmenta, kapacitet deonice i kapacitet raskrsnice.

Deonice u saobraćajnom sistemu predstavljaju elemente sa fiksnim tehničkim karakteristikama i uslovno rečeno "fiksni" kapacitetom. U priručniku HCM iz 2010. godine, kapacitet je definisan kao: *maksimalan broj vozila za koji se može očekivati da prođe odgovarajući poprečni presek saobraćajne trake ili deonice u posmatranoj jedinici vremena, pod preovlađujućim uslovima puta, uslovima saobraćaja i načinom upravljanja saobraćajem*. Pod uslovima puta, podrazumevane su prevashodno tehničke karakteristike saobraćajnice kao što su: broj saobraćajnih traka, širina saobraćajnih traka, projektovana brzina, poprečni i uzdužni nagib terena, okruženje saobraćajnice i ostali elementi koji se mogu okarakterisati kao tehničke karakteristike. Pod saobraćajnim uslovima, podrazumevana je struktura saobraćajnog toka, raspodela saobraćaja po smeru kretanja na deonici i raspodela saobraćaja po saobraćajnim trakama.

Gradska urbana područja karakterišu prekinuti saobraćajni tokovi. Posmatrajući raskrsnicu, kao tačku u kojoj preraspodelom saobraćajnog opterećenja dolazi do promene kapaciteta, ovaj element ostavlja daleko više prostora za primenom različitih mehanizama upravljanja u odnosu na deonicu. Način upravljanja raskrsnicom ima veoma značajan uticaj na kapacitet. S obzirom da se raskrsnice mogu shvatiti kao neka vrsta "uskog grla" na uličnoj mreži, vremenom su počela da se inteziviraju istraživanja na temu optimizacije kapaciteta raskrsnice uzimajući u obzir sveobuhvatan skup uticajnih faktora.

Jedan od osnovnih elemenata upravljanja raskrsnicom su svetlosni signali. Raspodelom vremena mogućeg prolaska kroz signalisanu raskrsnicu direktno se utiče na kapacitet deonice na prilazu raskrsnici. Proračun kapaciteta na

nesignalisanim raskrnicama zasnovan je na teoriji verovatnoće, kojom se pretpostavlja da će veličina intervala sleđenja vozila na prioritetnom pravcu omogućiti realizaciju zahteva za opslugom koji se ispostavljaju sa sporednih prilikaza. U tom smislu je kapacitet ovih raskrznica manje determinisan. Važno je napomenuti da raskrnica, iako predstavlja element na kome dolazi do prekida ili ometanja saobraćajnog toka, svesno pri tome proizvodeći određene vremenske gubitke, istovremeno doprinosi uspostavljanju ravnoteže u optimalnom iskorišćenju postojećih kapaciteta ulične mreže (Čelar, 2007).

Većina procedura za proračun kapaciteta podrazumeva ispunjenost opštih uslova: dobre vremenske prilike, dobar kvalitet kolovoza, poznavanje trase kretanje i nepostojanje barijera u realizaciji saobraćajnog procesa. Za razliku od većine faktora koji figurišu u proračunu kapaciteta raskrsnice na koje se može uticati u kontekstu postojanosti, nepovoljne vremenske prilike predstavljaju izuzetak. Ne postoji mogućnost da se njihova pojava spreči.

Mala mogućnost delovanja u cilju sprečavanja nepovoljnih vremenskih prilika težište delovanja prebacuje na proces prilagođavanja, kako učesnika u saobraćaju, tako i saobraćajnog sistema u celosti. Prvi korak u tom procesu predstavlja kvantifikacija uticaja.

Osetljivost kapaciteta ulične mreže na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika istraživaće se na signalisanim raskrnicama. Razlog za to, predstavlja fleksibilnost u pogledu upravljanja kapacitetom signalisane raskrsnice. Period u okviru kojeg raskrnica opslužuje vozila na prilazu je determinisan signalnim planom, a optimizacija signalnih planova uglavnom ne uzima u obzir uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. Promene u kapacitetu signalisanih raskrznica pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika istraživaće se indirektno, kroz promenu vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (u daljem tekstu ZST).

Zasićeni saobraćajni tok

Većina modela za proračun kapaciteta signalisane raskrsnice bazirana je na proračunu zasićenog saobraćajnog toka signalisane raskrsnice. Osnovni oblik

proračuna kapaciteta na signalisanoj raskrsnici dao je Webster (Webster & Cobbe, 1966).

$$K = \frac{gS}{C} \left(\frac{voz}{h} \right)$$

K – kapacitet prilaza signalisanoj raskrsnici u vozilima na čas

g – efektivno zeleno vreme (predstavlja razliku između zbira stvarnog trajanja zelenog signalnog pojma i trajanja žutog signalnog pojma i neiskorišćenog dela zelena faze)

S – zasićeni saobraćajni tok u vozilima na čas

C – dužina trajanja ciklusa u sekundama

Pod zasićenim saobraćajnim tokom podrazumeva se protok vozila koji bi se mogao opslužiti, ako bi na prilazu postojao kontinuirani red vozila, za vreme trajanja zelenog signalnog pojma od sat vremena. Na osnovu predstavljenog obrazca za proračun kapaciteta raskrsnice, može se zaključiti, da praktično, pored trajanja zelenog signalnog pojma, vrednost kapaciteta zavisi od proračuna zasićenog saobraćajnog toka. Kada je reč o optimizaciji upravljanja saobraćajem svetlosnim signalima u odnosu na postavljene kriterijume (vremenske gubitke, kapacitet, emisije štetnih gasova i drugo) jednu od najzačajnijih aktivnosti predstavlja određivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

U zavisnosti od primenjene metodologije utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka razvijene se dve kategorije modela: teorijski i empirijski.

Postoji veliki broj teorijskih modela koji se koriste za utvrđivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Osnovnu razliku u teorijskim modelima predstavljaju različite bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka i vrsta i vrednost korekcionih faktora. U Prilogu III predstavljeno je 5 modela teorijskog proračuna zasićenog saobraćajnog toka koji su visoko rangirani po učestalosti primene.

Na osnovu teorijskih modela za proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, koji su predstavljeni u Prilogu III, može se zaključiti da je kod većine modela analiziran veoma sličan opseg faktora uticaja. Međutim, iskustva su pokazala da postoje i drugi faktori uticaja koji nisu obuhvaćeni navedenim modelima. Jedan od takvih uticaja su nepovoljne vremenske prilike. Posmatrajući prirodu nepovoljnih

vremenskih prilika, pretpostavka je da iz tri osnovna razloga ovaj uticaj nije implementiran u modele:

- složenost kvantifikacije uticaja,
- diskontinuitet prisustva i
- varijabilnost uticaja.

I pored toga što na osnovu navedenih pretpostavki postoji opravdanost za izostavljanjem ovog uticaja iz modela, imajući u vidu potrebu za maksimalnim iskorišćenjem postojećih kapaciteta, svaki uticaj koji bi mogao da utiče na redukovanje kapaciteta treba uzeti u obzir. Upravo to je i predstavljalo inicijalni motiv za istraživanjem uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet saobraćajne mreže.

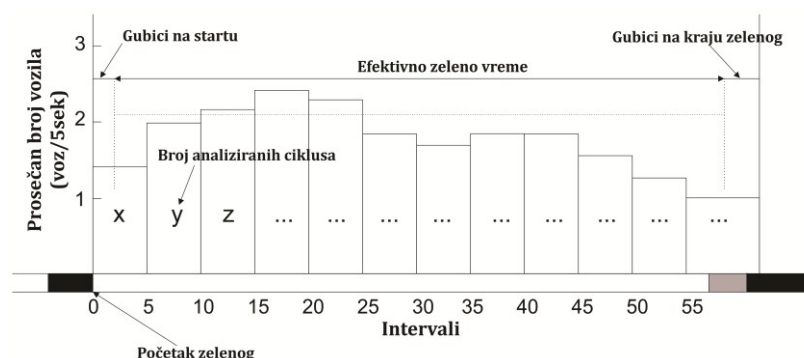
Kod empirijskog utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka suština je, da se na osnovu snimanja i analize realizacije saobraćajnog toka na terenu utvrde veličine koje predstavljaju ulazni parametar za proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

Da bi se na odgovarajući način snimila vrednost zasićenog saobraćajnog toka poželjno je da postoji zasićeno stanje na raskrsnici. Ukoliko to nije slučaj, potrebno je izdvojiti zasićene periode nezasićenih stanja i u okviru njih realizovati istraživanja (Čelar, 2007). Pod zasićenim periodom podrazumeva se period kontinualnog pražnjenja reda na prilazu raskrsnici. Red je formiran od vozila koja su zaustavljena na prilazu raskrsnici čekajući početak zelenog signalnog pojma. Redu se mogu pridružiti i vozila koja se nisu zaustavila, ali su se toliko sporo kretala da je rastojanje sleđenja između poslednjeg vozila u redu i pridruženog vozila manje od pola prosečne dužine vozila (Čelar, 2007).

Empirijsko utvrđivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka može se okarakterisati kao relativno jednostavno, imajući u vidu da je potrebna samo kvalitetno razvijena metodologija snimanja i dovoljan uzorak snimljenih veličina. Kada je u pitanju analiza konkretne lokacije, ovakav pristup snimanja vrednosti

zasićenog saobraćajnog toka obezbeđuje i veću preciznost tražene veličine u odnosu na teorijske modele. U osnovi se razlikuju dva tipa metodološkog pristupa:

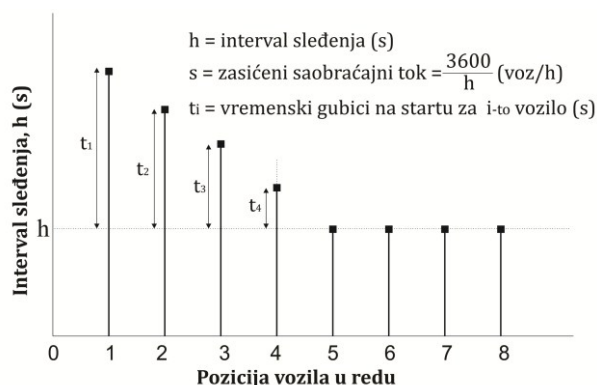
- Metodologije koje se baziraju na evidentiranju broja vozila u okviru manjih vremenskih intervala u periodu od početka trajanja zelenog signalnog pojma do početka crvenog signalnog pojma, pri tome obuhvatajući i žuti signalni pojam (J. Turner & Harahap, 1993). Analizirani period je podeljen na manje vremenske intervale (od 5 ili 6 sekundi, u literaturi postoje varijacije), u okviru kojih se beleži broj vozila koji prođu zaustavnu liniju. U okviru tih intervala, u zavisnosti od broja analiziranih ciklusa utvrđuju su prosečne vrednosti protoka. Osnovna ideja podele perioda analize na manje vremenske intervale je utvrđivanje i izdvajanje isključivo zasićenih intervala koji ulaze u dalju analizu. Na narednoj slici je data grafička interpretacija pomenute metode (Slika 10). Svaki stubić predstavlja prosečan broj vozila koji je zabeležen u određenom intervalu za posmatrani broj ciklusa (x, y, z...).



Slika 10 Proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (Metoda 1)

- Metodologije koje se baziraju na evidentiranju vremenskog intervala između uzastopnog prolaska vozila preko zaustavne linije (intervala sleđenja), tokom trajanja zelenog signalnog pojma. U okviru ove metodologije ne postoji podela analiziranog perioda na manje vremenske intervale, već se saobraćajni tok pri procesu pražnjenja reda posmatra u kontinuitetu. U zavisnosti od usvojenih kriterijuma, početak snimanja intervala sleđenja značajnih za utvrđivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka varira. U literaturi se mogu pronaći različite preporuke koje ukazuju na to od kog

vozila u redu treba započeti analizu intervala sleđenja. Asamer (2011) u svom radu navodi nekoliko primera: preporuke iz HCMa (HCM 2000) su da se za proračun reprezentativne vrednosti intervala sleđenja uzmu u obzir vozila iza četvrte pozicije u redu (Slika 11), preporuke KHCMa su iza šestog vozila u redu (KHCM, 1992), dok su preporuke pojedinih autora iza trećeg vozila u redu (Shin & Choi, 1998).



Slika 11 Proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (Metoda 2) (HCM 2000)

U obe metodologije vrednost zasićenog saobraćajnog toka je izračunavana na identičan način:

$$S = \frac{3600}{h}$$

U skladu sa teorijskom definicijom zasićenog saobraćajnog toka brojilac se odnosi na sat vremena zelenog signalnog pojma (u sekundama), a h predstavlja merodavnu vrednost prosečnog intervala sleđenja.

Ono što je takođe zajedničko za obe metodologije je da su fokusirane na analizu prolazaka vozila tokom središnjeg perioda trajanja zelenog signalnog pojma kada se proces pražnjenja reda na određeni način normalizuje, izbegavajući na taj način vremenske gubitke koji se javljaju na startu i na kraju zelenog signalnog pojma.

Značajan doprinos, kada je u pitanju metodologija utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u lokalnim uslovima, predstavlja magistarska teza Nikole Čelara iz 2007. godine. Istraživanja u okviru pomenute teze, pored ostalog, imala su za cilj da daju smernice u definisanju metodologije i tehnike utvrđivanja vrednosti

zasićenog toka, da definišu bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka prilagođene domaćim uslovima i da se utvrdi priroda ponašanja vrednosti zasićenog toka u različitim uslovima. Razmatrani su mesto i uloga raskrsnice u saobraćajnom sistemu, uticaj neposrednog okruženja, period opservacije i udeo zasićenih stanja u ukupnom uzorku. Rezultati istraživanja, u okviru pomenute magistarske teze, u velikoj meri su opredelile izbor i definisanje metodologije istraživanja promene vrednosti zasićenog saobraćajnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika koja je primenjena u okviru ove disertacije. Osnovni zaključci do kojih je došao autor pomenute magistarke teze su (Čelar, 2007):

- Utvrđivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka zavisi od karakteristika konkretne lokacije, i ne može se posmatrati jedinstveno;
- Ne postoji značajna statistička razlika između realizacija snimanja u pojedinačnim ciklusima, odnosno može se reći da ona pripadaju istoj generalnoj populaciji;
- Zbog specifičnosti ponašanja, prvo vozilo u redu treba isključiti iz procedure utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka;
- Posmatrajući ukupan uzorak utvrđeno je da se za početak procesa kontinualnog pražnjenja reda može usvojiti četvrto vozilo, iako je primećeno da postoje i slučajevi pojave kontinualnog pražnjenja reda koji počinje dosta ranije, čak i od prvog vozila;
- Ponašanje poslednjeg vozila u redu se ne razlikuje od ponašanja ostatka reda.

Istraživanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika, praćenjem promene vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, realizovano je empirijski. Primenjeni pristup je zasnovan na *Metodi 2* koja je prezentovana u okviru ovog poglavlja. U skladu sa specifičnim okolnostima pod kojima su analizirane vrednosti zasićenog saobraćajnog toka opisana metoda je unapređena u cilju obezbeđenja višeg nivoa kvaliteta dobijenih rezultata.

4.2.1. Teritorijalna i vremenska obuhvatnost istraživanja

U pogledu izbora lokacije istraživanja, odnosno prostorne obuhvatnosti, postojalo je nekoliko dilema. Morala su biti ispoštovana dva osnovna ograničenja:

1. Da bi uticaj padavina mogao precizno da se oceni, bilo je neophodno da lokacija istraživanja bude smeštena u okviru uticajne zone AMS sa koje su prikupljeni podaci.
2. Karakteristike lokacije su morale da budu takve da omoguće uopštavanje zaključaka baziranih na rezultatima sprovedenih istraživanja.

Obavljena pilot istraživanja na deset individualnih signalisanih raskrsnica, doprineli su jasnijem sagledavanju problematike, i definisanju konačnih lokacija istraživanja. U odnosu na definisani predmet disertacije, cilj istraživanja nije predstavljalo utvrđivanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na različite karakteristike raskrsnice, već isključivo kvantifikacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na promene u vrednostima zasićenog saobraćajnog toka. Imajući u vidu prirodu korektivnih faktora koji se uzimaju u obzir u modelima teorijskog proračuna vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (Prilog III) kvantifikacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika empirijskim putem imala je za zadatak minimizaciju uticaja ostalih faktora uticaja.

Na osnovu uočenih činjenica, metodologija istraživanja i priroda analiziranog parametra uslovljavali su da lokacije istraživanja ispunjavaju nekoliko kriterijuma:

- da se istraživanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka realizuje za saobraćajnu traku pravo. Merenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na saobraćajnim trakama ostalih namena, često je izloženo uticaju faktora čiju je zakonitost promene teško prognozirati i modelovati (na primer, uticaj pešaka, ili broj vozila u konfliktom toku). To ne ide u prilog izolovanom posmatranju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika.
- da se na analiziranom prilazu raskrsnici, odnosno posmatranoj saobraćajnoj traci formira red vozila tokom trajanja crvenog signalnog

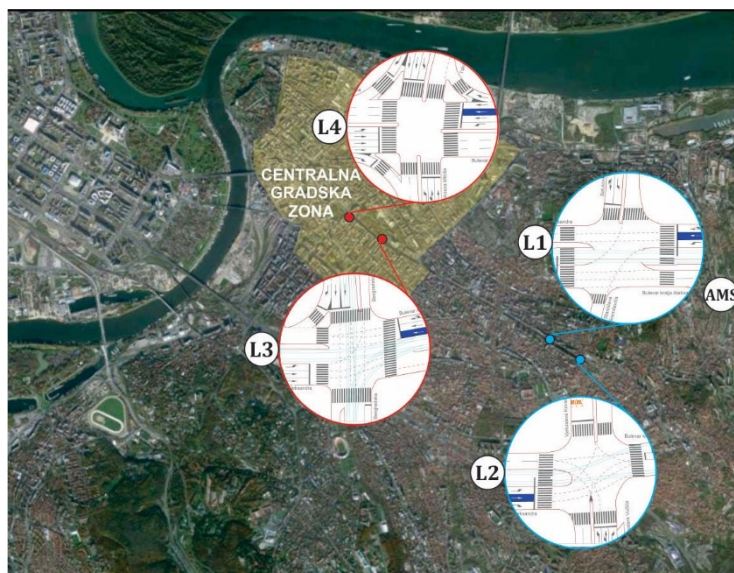
- pojma, odnosno da se realizuje adekvatan nivo transportnih zahteva na analiziranoj saobraćajnoj traci.
- da postoji neometana realizacija pražnjenja reda. Da red koji se formira na narednoj raskrsnici nema nikakvog uticaja na vozila koja napuštaju analiziranu raskrsnicu. Zatim, da broj ulaznih saobraćajnih traka na prilazu raskrsnici bude isti kao i broj saobraćajnih traka na izlazu iz raskrsnice.
 - da raskrsnica ima dobre tehničke karakteristike i standardnu geometriju, bez uzdužnih nagiba na prilazu raskrsnici.
 - da se u bliskom okruženju raskrsnice ne vrše parking manevri i da u bliskom okruženju raskrsnice ne postoje stajališta javnog gradskog prevoza.
 - da u strukturi saobraćajnog toka broj vozila javnog gradskog prevoza putnika i komercijalnih vozila bude što je moguće manji.

U skladu sa prethodnim iskustvima, uticaj nepovoljnih vremenskih prilika je uglavnom istraživana na glavnim gradskim saobraćajnicama. Ova kategorija saobraćajnica je bila predmet istraživanja zbog visokih vrednosti protoka saobraćaja, naročito u vršnim periodima. U tom slučaju, svaki dodatni uticaj na redukciju kapaciteta treba uzeti u obzir. Nepredviđene situacije i različiti potencijalni uticaji koji utiču na smanjenje kapaciteta na ovoj kategoriji saobraćajnica, veoma brzo problem zagušenja prenose i na ostale delove ulične mreže. To posebno dolazi do izražaja kod uličnih mreža koje ne raspolažu velikim brojem alternativnih putanja. Sa druge strane, na saobraćajnicama visoke kategorije uglavnom postoje najveće mogućnosti za prilagođavanjem sistema upravljanja saobraćajem u odnosu na uslove pod kojima se saobraćaj realizuje.

Jedan od elemenata analize uticaja na karakteristike saobraćajnog toka koji je pored nepovoljnih vremenskih prilika pomenut kroz pregled literature je i nivo osvetljenosti. Iako se ovaj uticaj ne može svrstati u vremenske prilike, uzet je u obzir ali nije detaljno analiziran. U urbanoj sredini, ocena razlike između nivoa osvetljenosti tokom dana ili pod gradskom rasvetom predstavlja kompleksan poduhvat koji zahteva specifična istraživanja. Sa druge strane, veoma mali procenat realizovanih vršnih sati bez prisustva dnevne svetlosti tokom godine

doprineo je izuzimanju analize uticaja osvetljenosti. S tim u vezi, značajno je istaći da su kompletna istraživanja realizovana pod prisusustvom dnevne svetlosti.

Imajući u vidu prethodno navedeno, za potrebe istraživanja definisane su četiri nezavisne signalisane raskrsnice. Dve raskrsnice su pozicionirane u užoj centralnoj gradskoj zoni (L3 i L4) dok su dve pozicionirane na obodu centralne gradske zone (L1 i L2) (Slika 12). Na izbor konkretnih raskrsnica delom je uticala i činjenica da na pojedinim raskrsnicama Sektor za upravljanje i regulisanje saobraćaja, Sekretarijata za saobraćaj Grada Beograda, vrši video nadzor saobraćajne situacije na terenu.



Slika 12 Lokacije analiziranih raskrsnica

Širina saobraćajnih traka na raskrsnicama u okviru kojih je meren zasićeni saobraćajni tok je iznosila 3.25 m. Učešće zelenog signalnog pojma u ciklusu (g/C) se na analiziranim prilazima svake od raskrsnica kretalo oko 0.4, dok su dužine ciklusa varirale.

U zavisnosti od svrhe i cilja istraživanja, broj analiziranih lokacija u prethodnim istraživanjima uglavnom se kretao u opsegu od jedne do nešto više od deset lokacija. Na definisanje neophodnog broja lokacija istraživanja utiče i svrha istraživanja, odnosno da li je reč o unapređenju sistema upravljanja saobraćajem, implementaciji faktora uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u politike

upravljanja transportnim zahtevima, povećanje nivoa bezbednosti itd. U konkretnom slučaju, reč je o istraživanju osetljivosti kapaciteta ulične mreže na nepovoljne vremenske prilike i kvantifikaciji toga uticaja na makro nivou. Imajući u vidu da definisane četiri lokacije u velikoj meri ispunjavaju prethodno navedene kriterijume, formirane baze podataka iz istraživanja omogućile su ispitivanje korelacije između analiziranih veličina.

Vremensku obuhvatnost istraživanja bilo je veoma teško unapred definisati zbog nepredvidivosti vremenskih prilika. Definisanje perioda istraživanja je bilo bazirano na podacima iz više centara informisanja o prognozi vremenskih prilika: www.hidmet.gov.rs, www.weather2umbrella.com, www.accuweather.com. S obzirom da su kao vrsta karakterističnih vremenskih prilika, koja ima najznačajniji uticaj na saobraćajni sistem definisane padavine, pažnja je bila fokusirana na periode tokom godine sa najvećom verovatnoćom ove pojave. U pitanju su bili meseci od septembra do maja. Algoritam plana, vezan za period realizacije istraživanja, imao je sledeću strukturu:

- | | |
|-----|--|
| I | <u>Fokusirati se na period u toku godine sa najvećom verovatnoćom pojave padavina.</u> |
| II | <u>Informisati se pomoću dostupnih izvora o prognozi vremenskih prilika.</u> |
| III | <u>Ukoliko su najavljene padavine, organizovati izlazak na teren. Vreme izlaska na teren podesiti tako da se obuhvati jutarnji vršni čas.</u> |
| IV | <u>Ukoliko su u jutarnjem vršnom satu padavine identifikovane, podatke istraživanj sačuvati i pripremiti za obradu. Ukoliko je bilo padavina, ali van vršnog časa, podatke istraživanj sačuvati i spremi se za naredni izlazak na teren.</u> |

4.2.2. Metoda prikupljanja podataka i merna oprema

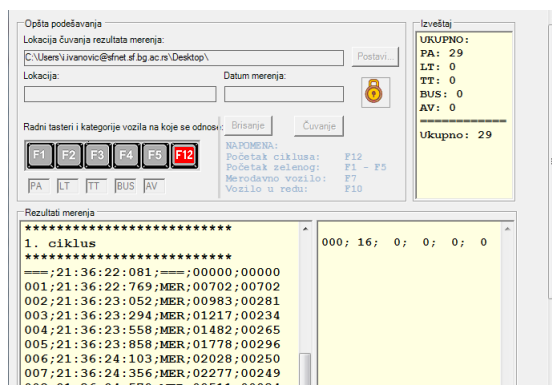
Suštinu u kvalitetnoj kvantifikaciji uticaja padavina na vrednost zasićenog saobraćajnog toka predstavlja eliminisanje, odnosno minimizacija svih ostalih potencijalnih uticaja na zasićeni tok. Specifičnost istraživanja zavisnosti između nepovoljnih vremenskih prilika i zasićenog saobraćajnog toka, uslovlila je da se istraživanja realizuju istovremeno na svim lokacijama.

Na svakoj od raskrsnica, istraživanja su realizovana za saobraćajnu traku pravo. Postoje različite metodologije utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Metodologija primenjena u ovom radu je podrazumevala beleženje intervala sleđenja između pojedinačnih vozila u procesu pražnjenja reda. Referentnu tačku

evidentiranja prolaska vozila tokom zelene faze ciklusa, predstavljala je zaustavna linija. Trenutak evidentiranja prolaska vozila se odnosio na momenat prolaska zadnje osovine vozila preko zaustavne linije.

U literaturi se mogu pronaći različite metodologije koje ukazuju na to od kog vozila u redu treba započeti analizu intervala sleđenja merodavnih za proračun vrednosti zasićenog toka, što je već pomenuto u prethodnom poglavlju. Istraživanja su pokazala da su izuzetno retki slučajevi stabilne realizacije procesa pražnjenja reda, praćeni nekim konstantnim trendom njegove promene (Čelar, 2013). Pod stabilnom realizacijom pražnjenja reda podrazumeva se da intervali sleđenja budu približnih vrednosti, bez velikih oscilacija, dok se pod konstantnim trendom promene podrazumeva ravnomernost, kontinualno povećanja ili u krajnjoj situaciji kontinualno smanjenje vrednosti intervala sleđenja. Imajući u vidu specifičnost istraživanja, za potrebe ispitivanja osetljivosti vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na nepovoljne vremenske prilike razvijena je posebna metodologija.

Za snimanje procesa pražnjenja reda korišćene su video kamere. Podaci o intervalima sleđenja na osnovu video snimaka procesuirani su posebnim softverom. Softver je kreiran 2007. godine na Katedri za regulisanje saobraćaja, Saobraćajnog fakulteta u Beogradu (sada Katedra za planiranje i regulisanje saobraćaja). Jednostavnost okruženja i algoritma funkcionisanja softvera obezbeđuje korisniku efikasan način dolaženja do neophodnih podataka (Slika 13)



Slika 13 Osnovno okruženje softvera za beleženje intervala sleđenja

Podaci su beleženi na nivou ciklusa. Osnovne karakteristike softvera koje su ga preporučile za upotrebu u ovim istraživanjima su:

- Mogućnost beleženja rednog broja vozila u redu
- Mogućnost beleženja apsolutnog vremena prolaska svakog pojedinačnog vozila preko definisane referentne tačke (u konkretnom slučaju preko zaustavne linije)
- Mogućnost beleženja vremena prolaska na nivou milisekunde
- Proračun kumulante vremena prolaska svakog vozila od početka snimanja
- Mogućnost beleženja kategorije vozila na koju se odnosi interval sleđenja (PA, LT, TT, BUS)

Kada je reč o obradi podataka o intervalima sleđenja sa video zapisa, olakšavajuću mogućnost predstavlja to što je korisnik u prilici da na jednostavan način selektuje cilkuse koji će biti uzeti u obzir pri formiranju uzorka. Takođe, u slučaju greške u obradi podataka, uvek postoji mogućnost vraćanja video snimka do kritičnog trenutka. Sa druge strane, ne treba zanemariti činjenicu da je u ovakvom načinu obrade podataka veoma značajan element ljudski faktor. Pri svakom pritisku na taster softvera postoji mogućnost pojave minimalnih odstupanja vremena prolaska zadnje osovine vozila i reakcije korisnika softvera. Iako je vrednost ovih odstupanja veoma mala, treba imati u vidu da su vrednosti intervala sleđenja mereni na nivou milisekunde. U situacijama kada se podaci o intervalima sleđenja dobijaju direktno preko senzora i detektora ugrađenih u kolovoznu konstrukciju ova odstupanja jesu manja. Negativnu stranu te metode može da predstavlja izdvajanje kvalitetnog uzorka, jer korisnik nema informaciju o načinu ponašanja vozača. Idealno rešenje bi predstavljala mogućnost kombinovanja ove dve metode istraživanja, video kamere u kombinaciji sa detektorima i sensorima, ali to u konkretnom slučaju nije bilo moguće realizovati.

Jedan deo podataka je snimljen i metodologijom neposrednog osmatranja i beleženja podataka na terenu. Ovakav način beleženja podataka je primenjivan u situaciji kada podaci sa video kamera Centra za upravljanje i regulisanje saobraćaja nisu bili raspoloživi. Za potrebe ovog načina istraživanja korišćena je Android aplikacija koja poseduje apsolutno preslikane karakteristike opisanog softvera. Mogućnost korišćenja mobilnog telefona u ovu svrhu, umesto prenosivog računara, u znatnoj meri je pojednostavila realizaciju istraživanja.

4.2.3. Uzorak istraživanja

U okviru vršnog perioda, u različitim vremenskim prilikama, na sve četiri raskrsnice snimljen je ukupno 1351 ciklus. Iz ukupnog uzorka su eliminisani ciklusi koji su sadržali komercijalna vozila ili vozila javnog prevoza u formiranom redu. Takođe, eliminisani su i ciklusi u okviru kojih je identifikovano veliko odstupanje u pojedinim intervalima sleđenja, nastalo kao posledica problema sa motornim vozilom ili nesavesnog ponašanja vozača. Na ovaj način formirana je baza od 1133 merodavnih ciklusa na istraživanim lokacijama za različite tipove vremenskih prilika (Tabela 36). Ovim uzorkom je obuhvaćeno 14.710 intervala sleđenja.

Tabela 36 Broj snimljenih ciklusa u različitim vremenskim prilikama

Obod centralne zone				Centralna zona			
Lokacija I		Lokacija II		Lokacija III		Lokacija IV	
Vremenske prilike	Broj ciklusa	Vremenske prilike	Broj ciklusa	Vremenske prilike	Broj ciklusa	Vremenske prilike	Broj ciklusa
IVP	105	IVP	91	IVP	100	IVP	83
KKI	98	KKI	89	KKI	111	KKI	100
KKII	72	KKII	74	KKII	71	KKII	69
SSB	39			SSB	31		

SV-suvo vreme, KKI i KKII – kategorije kiše, SSB – sneg sa bljuzgavicom

Iz tabele se vidi da uticaj SSB nije analiziran na svim lokacijama već samo na Lokaciji I i Lokaciji III. Loša saobraćajna situacija prouzrokovana nepovoljnim vremenskim prilikama i tehnički problemi sa video nadzorom onemogućili su istraživanja ove vrste uticaja na sve četiri lokacije.

4.2.4. Način obrade prikupljenih podataka

U skladu sa definisanim kriterijumima izbora merodavnih ciklusa, u pojedinim situacijama, u cilju prikupljanja adekvatnog uzorka, bilo je potrebno istraživanja realizovati tokom više dana pod identičnim vremenskim prilikama. Iako su vremenski uslovi realizacije saobraćajnog procesa bili identični, u svakoj od tih situacija izvršeno je ispitivanje da li snimljeni intervali sleđenja po ciklusu tokom različitih dana pripadaju istoj populaciji.

S obzirom da je testiranjem utvrđeno da raspodela intervala sleđenja odstupa od normalne distribucije, ispitivanje pripadnosti istoj populaciji realizovano je primenom neparametarskih testa. U konkretnom slučaju korišćen je Man-Whitney

U test (Mann & Whitney, 1947). Suština Man-Whitney U testa je da se vrednosti elemenata poređenih grupa sortiraju po veličini i da se na taj način svakom elementu dodeli rang. Ako se vrednosti elemenata u velikoj meri razlikuju, onda će se razlikovati i njihovi rangovi, odnosno sume rangova. Iz toga se može zaključiti da kod ovog testa zapravo nije reč o poređenju realnih vrednosti elemenata poređenih grupa, već se vrši poređenje njihovih rangova. Metoda poređenja rangova zavisi od broja elemenata u poređenim grupama. Za primenu Man Whitney U testa korišćen je softver IBM SPSS Statistics 20. Za mali broj elemenata u poređenim grupama proračun U statistike se izvodi na sledeći način:

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - S_1$$

S_1 – suma rangova prve grupe

$n_{1,2}$ – broj elemenata prve, odnosno druge grupe

$$\text{za } U > \frac{n_1 n_2}{2}, \quad U' = n_1 n_2 - U$$

U slučaju većeg broja elemenata raspodela vrednosti U se približava normalnoj raspodeli.

$$n_1 n_2 \leq 400 \quad \text{i} \\ \frac{n_1 n_2}{2} + \min(n_1, n_2) \leq 200$$

U tom slučaju se značajnost statistike U ocenjuje na osnovu izraza:

$$Z = \frac{(U - \frac{n_1 n_2}{2})}{\sqrt{\frac{n_1 n_2}{N(N-1)} (\frac{N^3 - N}{12} - \sum_i T_i)}}, \quad T_i = \frac{t^3 - t}{12}$$

N – ukupan broj elemenata ($n_1 + n_2$)

t – broj observacija vezanih za rang i

U situaciji kada je na nekoj od lokacija istraživanje pod istim vremenskim prilikama realizovano tokom većeg broja dana, ciklusi su u cilju testiranja pripadnosti istoj populaciji birani iz ukupnog uzorka na slučajan način. Pripadnost izabranih ciklusa istoj populaciji je testirana Man Whitney U testom.

U narednoj tabeli prikazani su rezultati primene pomenutog testa za idealne vremenske prilike na Lokaciji I (u daljem tekstu Lokacija I (IVP)) na kojoj je uzorak ciklusa formiran na osnovu višednevnih snimanja (Tabela 37).

Tabela 37 Ispitivanje pripadnosti populaciji

	Cikl. 3	Cikl. 32	Cikl. 12	Cikl. 79	Cikl. 51	Cikl. 42	Cikl. 64	Cikl. 91	Cikl. 23	Cikl. 99
Cikl. 3		0.472	0.791	1	0.61	0.895	0.284	0.92	0.742	0.895
Cikl. 32			0.627	0.354	0.494	0.27	0.753	0.815	0.427	0.508
Cikl. 12				0.825	0.362	0.757	0.508	0.92	0.895	1
Cikl. 79					0.21	0.86	0.801	0.894	0.895	0.894
Cikl. 51						0.16	0.329	0.764	0.305	0.224
Cikl. 42							0.274	0.125	0.691	0.757
Cikl. 64								0.627	0.682	0.592
Cikl. 91									0.973	0.894
Cikl. 23										0.965
Cikl. 99										

Rezultati testiranja su pokazali da ne postoji značajna statistička razlika između slučajno izabranih ciklusa. I kada je reč o ostalim slučajevima u okviru kojih je istraživanje realizovano tokom više dana dobijeni su slični rezultati. Ovim se pokazalo da na istoj raskrsnici, odnosno saobraćajnoj traci, snimanje karakteristika saobraćajnog zasićenog toka različitih dana pod identičnim vremenskim uslovima, u istom periodu u toku dana, daje rezultate koji se mogu smatrati delom iste populacije.

Način obrade prikupljenih podataka vezanih za ispitivanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, je prikazan kroz konkretan primer. S obzirom da su u prethodnoj tabeli (Tabela 37) predstavljeni podaci vezani za Lokaciju I (IVP) i za prikaz analize podataka, biće iskorišćen isti primer. Važno je istaći da je prezentovana analiza prikupljenih podataka primenjena za svaku lokaciju i svaki analizirani tip vremenskih prilika.

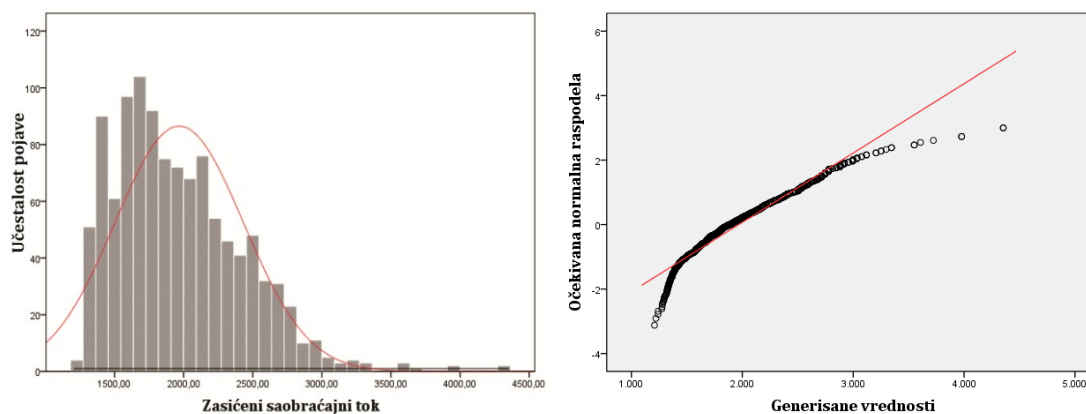
Pošto je zasićeni saobraćajni tok numerička promenljiva koja direktno zavisi od utvrđenih intervala sleđenja vozila u procesu praznjenja reda na raskrsnici, ispitivana je normalnost distribucije intervala sleđenja Kolmogorov-Smirnov testom. Kao dodatni test u ispitivanju normalnosti distribucije primenjen je i Shapiro-Wilk test koji se uzima kao stroži kriterijum normalnosti distribucije.

U tabeli 38 prikazani su rezultati testiranja normalnosti raspodele vrednosti intervala sleđenja u ukupnom uzorku na Lokaciji I (IVP).

Tabela 38 Testiranje normalne raspodele intervala sleđenja za Lokaciju I (IVP)

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ZST	.082	1109	.000	.944	1109	.000

Kako je Kolmogorov-Smirnov test statistički značajan ($p < 0.01$), zaključuje se da distribucija statistički značajno odstupa od normalne. Do istog zaključka se dolazi i primenom Shapiro-Wilk testa. Na narednim slikama je data i grafička interpretacija dobijenih rezultata testiranja (Slika 14)



Slika 14 Prikaz rezultata testiranja normalne raspodele za Lokaciju I (IVP)

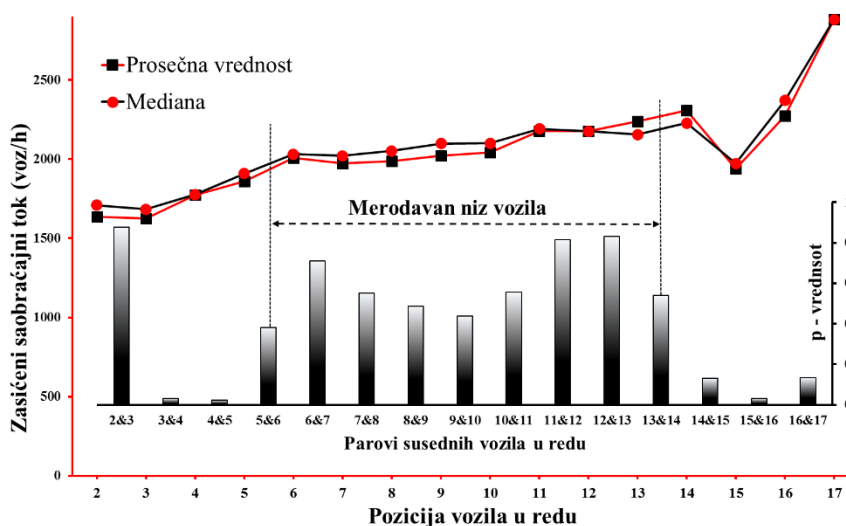
U okviru disertacije nisu vršena dalja ispitivanja vezana za utvrđivanje raspodele. Pošto testiranje nije pokazalo poklapanje sa normalnom distribucijom, to je predstavljalo dovoljan razlog za primenu neparametrijskih statističkih tehnika.

Usled konstatacije da su u proceduri pražnjenja reda prisutne neravnomernosti u intervalima sleđenja, ideja je bila da se u procesu pražnjenja reda identifikuje niz vozila za koji se uslovno može reći da su neravnomernosti najmanje izražene. Sve prethodno pomenute metodologije proračuna zasićenog saobraćajnog toka su bazirane na toj logici. U cilju dobijanja približnije informacije o merodavnom nizu vozila, odnosno nizu vozila koji oslikava relativno ravnomerno pražnjenje reda, korišćen je neparametarski Man Whitney U test. Upotrebna vrednost primene Man Whitney U testa u okviru ove analize može se oceniti kao nadgradnja na postojeće metodologije u cilju bolje ocene "idealne" vrednosti kapaciteta raskrsnice. Na primer, ukoliko se želi oceniti stepen različitosti između intervala sleđenja trećeg i četvrtog vozila, prvu grupu podataka činili bi svi zabeleženi intervali sleđenja trećeg vozila, dok bi drugu grupu činili svi zabeleženi intervali sleđenja četvrtog

vozila. Ovim testom se ne dobija ekzaktna informacija o tome da li postoji značajna razlika između intervala sleđenja uzastopnih vozila. Rezultat testiranja pojednostavljuje proceduru donošenja odluke, koji niz vozila uzeti kao merodavan, ukazujući na stepen različitosti između intervala sleđenja susednih vozila preko dobijene p - vrednosti. U odnosu na postavljenu početnu hipotezu veća p - vrednost govori u prilog tome da su poređene grupe podataka sličnije.

Zbog odsustva normalnosti raspodele intervala sleđenja, pored proračuna prosečne vrednosti intervala sleđenja za merodavan niz vozila, u obzir je uzet i proračun mediane intervala sleđenja merodavnog niza vozila.

Na grafiku 7 je prikazana procedura utvrđivanja merodavnog niza vozila za proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za Lokaciju 1 (IVP).



Grafik 7 Procedura utvrđivanja merodavnog niza vozila

Na grafiku su prikazane promene prosečnih vrednosti i mediane zasićenog saobraćajnog toka za svako od vozila u redu (linijski dijagram). Prvo vozilo je izostavljeno iz analize vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Za to je postojalo nekoliko razloga:

- tokom snimanja je uočen veliki broj slučajeva nepravilnog postavljanja prvog vozila u redu, u odnosu na zaustavnu liniju,
- uočen je veliki broj situacija u kojim proces pražnjenja reda kreće za vreme trajanja žutog signalnog pojma,

- agresivno ponašanje velikog broja vozača vozila na prvim pozicijama u redu uzrokovao je veoma male vrednosti vremenskog intervala između pojave zelenog signalnog pojma i prolaska prvog vozila preko zaustavne linije

Rezultati primene Man Whitney U testa su prikazani na grafiku (dijagram sa stubićima). Na dijagramu sa stubićima je prikazan nivo sličnosti intervala sleđenja uzastopnih vozila. Nivo sličnosti intervala sleđenja poređenih parova vozila u redu je ocenjen preko *p-vrednosti*.

Iako se u konkretnom primeru broj vozila u snimljenim ciklusima kretao do 17, na osnovu dobijenih rezultata, za merodavni niz prihvaćena su vozila u redu od pozicije 5 do pozicije 14. Najveće oscilacije u *p-vrednosti* zabeležene su posle poređenja para 4&5 (*p* - vrednost značajno raste) i posle poređenja para 13&14 (*p* - vrednost značajno opada). Minimalna vrednost *p* u merodavnom nizu vozila iznosi 0.38. Na nivou čitavog uzorka u konkretnom slučaju su izračunavane prosečna vrednost i medijana za utvrđeni merodavan niz vozila (od petog do četrnaestog vozila). Na osnovu dobijene reprezentativne vrednosti intervala sleđenja proračunavan je zasićeni saobraćajni tok. U prezentovanoj metodologiji primarno je bilo identifikovati između kojih vozila u nizu dolazi do značajnih oscilacija u *p-vrednosti*.

Identična metodologija je primenjena za svaku kombinaciju analiziranih lokacija i nepovoljnih vremenskih prilika.

4.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA OSETLJIVOSTI BRZINE KRETANJA VOZILA NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA

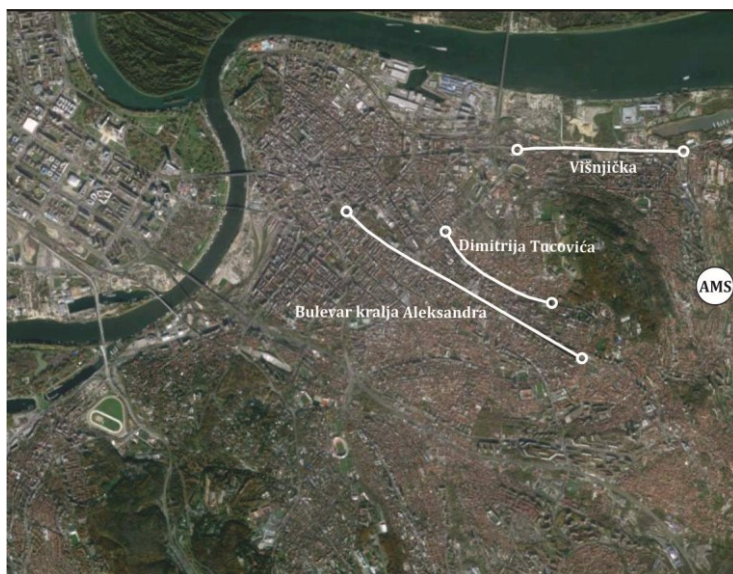
Drugi deo istraživanja vezan je za utvrđivanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila. Ovakvu vrstu istraživanja veoma je kompleksno realizovati na uličnoj mreži koju karakterišu prekinuti saobraćajni tokovi. Potrebno je, kao i u slučaju istraživanja vezanih za zasićeni saobraćajni tok, pronaći odgovarajuću lokaciju na kojoj je moguće minimizirati sve ostale potencijalne uticaje na brzinu kretanja vozila, kako bi se kvantifikovao isključivo uticaj nepovoljnih vremenskih prilika.

Fokus u ovom delu istraživanja je stavljen na utvrđivanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, na brzinu slobodnog toka i na eksploatacionu brzinu.

4.3.1. Teritorijalna i vremenska obuhvatnost istraživanja

U cilju definisanja teritorijalne obuhvatnosti, izvršena su pilot istraživanja. Istraživanja su realizovana na tri saobraćajnice, Bulevaru kralja Aleksandra, Ulici Dimitrija Tucovića i Višnjičkoj ulici (Slika 15). Dva ključna faktora su uticala na izbor navedenih lokacija pilot istraživanja:

1. **Kategorija saobraćajnica.** Po funkcionalnoj kategorizaciji, ove saobraćajnice predstavljaju gradske saobraćajnice prvog reda. Svaka od navedenih saobraćajnica ima dve trake po smeru. Smerovi su čitavom dužinom analiziranih segmenata razdvojeni razdelnim ostrvom. Saobraćajnice se pružaju se u pravcu, bez značajnih uzdužnih i poprečnih nagiba. Obrazloženje vezano za izbor saobraćajnica visoke kategorije kao predmet istraživanja je identičan kao i u slučaju analize osetljivosti kapaciteta na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika.
2. **Lokacijska pozicioniranost u odnosu na AMS.** Kao jedan od kriterijuma koji se može okarakterisati kao ograničavajući jeste da su lokacije istraživanja, bez obzira o kom istraživanom parametru je reč, morale da budu što bliže AMS. Na taj način se uticalo na nivo pouzdanosti podataka o vremenskim prilikama (Slika 15).



Slika 15 Lokacije pilot istraživanja

Osnovni cilj ovog dela istraživanja je bio kvantifikacija uticaja vremenskih prilika na promenu brzine kretanja vozila. Kao što je do sada više puta ponovljeno, da bi se kvantifikovao uticaj vremenskih prilika i na brzinu kretanja vozila, neophodno je sve ostale uticaje minimizirati.

U skladu sa tim, u toku pilot istraživanja identifikovano je nekoliko uticajnih faktora koji značajno otežavaju izolovano posmatranje uticaja vremenskih prilika:

- **Struktura saobraćajnog toka.** Istraživanja su pokazala da učešće teških teretnih vozila, lakih teretnih vozila i autobusa, utiče na brzinu kretanja ostalih vozila u saobraćajnom toku. U toj situaciji veoma je teško utvrditi koliki se udeo promene brzine vozila može pripisati lošim vremenskim uslovima.

Ono što je izrazito izdvajalo Višnjičku i Ulicu Dimitrija Tucovića od Bulevara kralja Aleksandra je struktura saobraćajnog toka. Na prve dve navedene saobraćajnice, zabeleženo je značajno veće učešće komercijalnih vozila u strukturi saobraćajnog toka. Kada je reč o vozilima javnog gradskog prevoza, učestalost pojave ove vrste vozila je na saobraćajnici Dimitrija Tucovića bila veća. Na Bulevaru kralja Aleksandra zabeleženo je malo učešće komercijalnih vozila u strukturi saobraćajnog toka. I u tim slučajevima uglavnom su u pitanju bila dostavna (kombi) vozila.

- **Stajališta javnog gradskog prevoza.** Ovaj uticaj je naročito izražen kada je reč o stajalištima javnog prevoza pozicioniranim u saobraćajnoj traci. Nedisciplinovanost vozača i obilaženje vozila javnog gradskog prevoza na stajalištu takođe utiče na relevantnost uzroka identifikovanih promena brzina pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika.
- **Pristupne saobraćajnice i prisustvo komercijalnih sadržaja uz saobraćajnicu.** Navedeni faktori u velikoj meri utiču na promene u brzinama kretanja vozila. Imajući u vidu da je u slučaju postojanja pristupnih saobraćajnica bez kontrolisanog upravljanja (nesignalisane raskrsnice), vremenska raspodela pristupa vozila je slučajna kao i raspodela izlivanja vozila. To otežava uspostavljanje zakonitosti u promeni brzine u kontekstu isključivosti analize uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Takođe je slična situacija i kada je reč o pristupu komercijalnim sadržajima koji su locirani uz saobraćajnicu.
- **Leva skretanja.** Leva skretanja koja nisu podržana posebnom saobraćajnom trakom takođe imaju uticaj na promenu brzine kretanja ostalih vozila u saobraćajnom toku. Povećanje broja zahteva za levim skretanjima čini ovaj uticaj intenzivnijim. Zato se za poželjnu lokaciju istraživanja preporučivala saobraćajnica sa zabranjenim ili posebno izdvojenim levim skretanjima.

Na osnovu podkriterijuma koji su generisani iz rezultata pilot istraživanja, odlučeno je da se istraživanje promene brzine pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika realizuje na Bulevaru kralja Aleksandra. Reč je o saobraćajnici koja sa funkcionalnog aspekta predstavlja jednu od najznačajnijih saobraćajnica u Beogradu. Povezuje zone različitog gradskog sadržaja i pruža se radijalno do samog centra grada. Ova saobraćajnica predstavlja najdužu gradsku saobraćajnicu, a istorijski posmatrano i najstariju saobraćajnicu Grada Beograda. Usled nedavne rekonstrukcije dobila je formu savremenog urbanog bulevara. Pored navedenih karakteristika, dodatnu povoljnost za istraživanja je predstavljalo postojanje sistema kamera duž saobraćajnice kojima upravlja Sektor za upravljanje i regulisanje saobraćaja Sekretarijata za saobraćaj Grada Beograda.

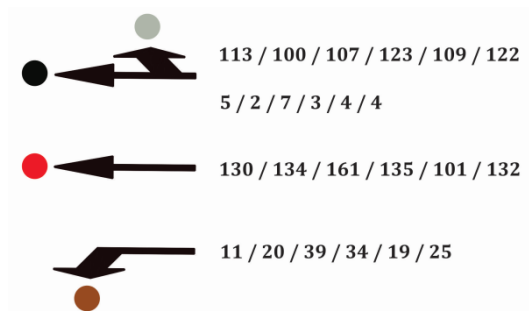
U pogledu tehničko - eksploatacionih karakteristika, skoro čitavom dužinom saobraćajnice postoje najmanje dve saobraćajne trake po smeru sa tramvajskim koridorom po sredini kolovoza. Postavljanjem tramvajskog koridora u centralni, posebno izdvojeni deo kolovoza, značajno je unapređen nivo usluge na saobraćajnici eliminisanjem ukrštanja tramvajskog i automobilskog saobraćaja i zabranom levih skretanja. Na većem delu saobraćajnice postoji koordinisano upravljanje svetlosnim signalima.

Detaljnou analizom selektovana je deonica koja je u najvećoj meri ispunjavala navedene kriterijume. Istraživanje je realizovano na deonici od raskrsnice Bulevar Kralja Aleksandra – Batutova (u daljem tekstu RAS1) do signalisanog pešačkog prelaza ispred raskrsnice Bulevar kralja Aleksandra – Čede Mijatović (u daljem tekstu RAS2³).

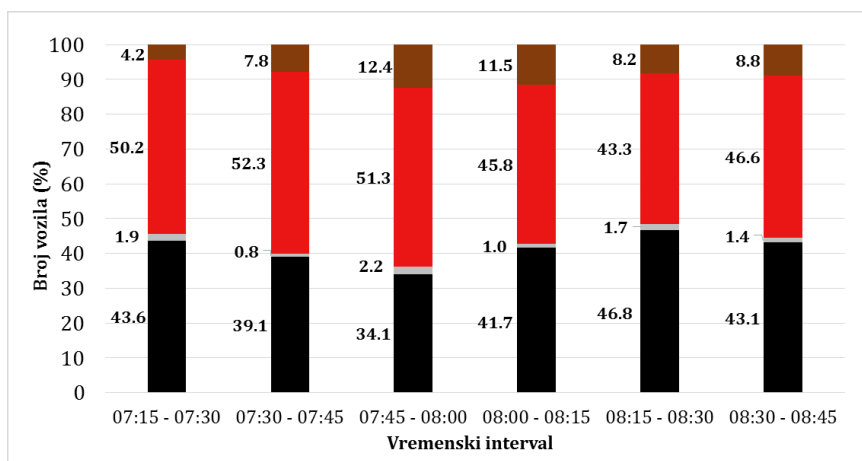
Analizirana deonica se sastoji od dve saobraćajne trake po smeru. Širina saobraćajnih traka je 3,25m. Dužina analizirane deonice je 380m. Istraživanja promene brzine kretanja vozila pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika realizovana su u smeru od Batutove ulice ka ulici Čede Mijatović (smer ka centru grada).

Na slici 16 je prikazana raspodela saobraćajnih traka i broj vozila na nivou petnaestominutnih intervala na analiziranom prilazu na RAS1. Procentualna raspodela vozila po saobraćajnim trakama, izražena u petnaestominutnim intervalima na analiziranom prilazu raskrsnici, predstavljena je na Grafik 8. Prikazani rezultati brojanja saobraćaja se odnose na period od 7:15 do 08:45 časova.

³ Iako je reč o pešačkom prelazu, a ne o klasičnoj raskrsnici, u daljem tekstu će za oznaku lokacije biti korišćena skraćenica "RAS2".



Slika 16 Raspodela saobraćajnih traka i broj vozila po petnaestominutnim intervalima



Grafik 8 Procentualna raspodela vozila po analiziranim petnaestominutnim intervalima

Prikazani rezultati predstavljaju prosečne vrednosti broja vozila koje su zabeležene tokom višednevnih snimanja, bez obzira na vremenske prilike. Sa grafika se vidi da je u raspodeli saobraćaja po saobraćajnim trakama najveće učešće uzima saobraćajna traka sa namenom pravo. U pogledu strukture saobraćajnog toka u mešovitoj saobraćajnoj traci, u desnom skretanju broj teških teretnih vozila i autobusa na nivou petnaestominutnih intervala varira između 4.2 i 12%. U saobraćajnoj traci pravo, na nivou satnih intervala, beleži se slučajan prolazak teškog teretnog vozila ili vozila javnog prevoza na nivou manjem od 1%. Međutim, u strukturi saobraćajnog toka koji se realizuje na saobraćajnoj traci pravo, beleži se značajno učešće lakih dostavnih vozila koje se na nivou petnaestominutnih intervala kreće između 2 i 13%. Ova pojava je naročito izražena u jutarnjem vršnom času. Uglavnom su u pitanju dostavna vozila koja svojim karakteristikama ne utiču u velikoj meri na promenu parametara osnovnih parametara saobraćajnog toka, odnosno sličnih su tehničkih karakteristika sa putničkim automobilom.

Rezultati odnosa raspodele saobraćaja po trakama su prikazani u cilju upoznavanja sa karakteristikama analiziranog prilaza raskrsnici. Analiza potencijalne promene intenziteta saobraćajnog opterećenja u odnosu na tip nepovoljnih vremenskih prilika u okviru disertacije nije detaljno analizirana. Osnovni razlog za to je što istraživanje nije podrazumevalo ispitivanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na transportne zahteve. Čak i kada bi se pokazalo da postoje razlike u intenzitetu opterećenja na istraživanim lokacijama pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika ne bi se moglo tvrditi da je uzrok promene ponuda transportnog sistema bez sveobuhvatne analize uticaja i na karakteristike transportnih zahteva.

U pogledu vremenske obuhvatnosti period istraživanja je definisan na identičan način kao što je to opisano u prethodnom poglavlju.

4.3.2. Metoda istraživanja i merna oprema

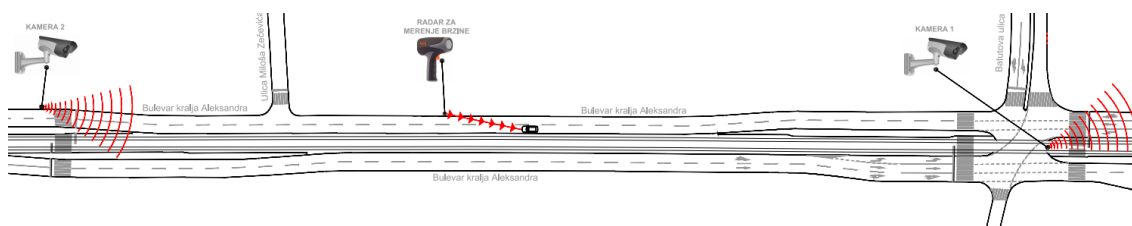
Na osnovu prikazanih rezultata raspodele saobraćajnog opterećenja na RAS1, i činjenice da je uz desnu saobraćajnu traku jednim delom deonice zastupljeno parkiranje pod 60°, odlučeno je da se konkretna istraživanja baziraju isključivo na krajnjoj levoj saobraćajnoj traci.

Činjenice koje su opredelile da se istraživanja realizuju na konkretnoj saobraćajnoj traci su sledeće:

- Izabranu saobraćajnu traku koriste vozila koja na prilazu RAS1 koriste saobraćajnu traku namene pravo. Većina vozila koja započne kretanje u ovoj saobraćajnoj traci, duž čitave deonice ostaje u istoj.
- Na ovoj deonici ne saobraćaju linije javnog gradskog prevoza, osim tramvaja koji su prostorno izmešteni.
- Parking mesta koja postoje duž deonice ostvaruju minimalan uticaj na vozila koja se kreću krajnjom levom saobraćajnom trakom.
- Struktura saobraćajnog toka je takva da veoma malo učešće uzimaju komercijalna vozila.

Neophodni podaci o osetljivosti brzine kretanja vozila na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na istraživanoj deonici prikupljeni su iz tri izvora (Slika 17):

1. Video kamere na početnoj i krajnjoj tački analizirane deonice;
2. GPS prijemnik u vozilu;
3. Radar za snimanje brzine.



Slika 17 Merni uređaji na analiziranoj deonici

Kao što se vidi sa slike 17 za potrebe snimanja brzine korišćene su kamere koje su snimale početnu i krajnju tačku analiziranog segmenta. Kamere su pozicionirane tako da omogućavaju identifikaciju trenutka prolaska vozila preko zaustavne linije.

Vremena na kamerama su podešena na nivo sekunde tako da je i zabeleženo vreme putovanja između zaustavnih linija mereno na nivou sekunde. U poređnom reprodukcijom snimaka sa RAS1 i RAS2 dobijana su vremena prolaska vozila analiziranim segmentom.

Pored snimaka sa kamere, u cilju dobijanja podataka o dinamici brzine kretanja vozila na analiziranom segmentu, korišćen je GPS prijemnik Garmin 18 OEM . GPS prijemnik koji se nalazio u vozilu preko USB porta ostvarivao je komunikaciju sa prenosivim računarom.

Osnovne karakteristike GPS prijemnika koje su doprinele izboru ovog uređaja u cilju prikupljanja neophodnih podataka su:

- Interval obrade informacija sa satelita, odnosno slanja paketa informacija ka eksternom uređaju (prenosivi računar) – 1 sekunda;
- Preciznost utvrđivanja realne pozicije na osnovu očitavanja koordinata – manja od 15 metara (očitanje pozicije nije bilo prioritetno);

- Preciznost očitavanja brzine kretanja – 0.1 čvor⁴

Rad uređaja je koncipiran na komunikaciji i prijemu podataka sa satelita, obradi podataka i prenošenju obrađenih podataka na perifernu jedinicu, u ovom slučaju prenosivi računar. GPS uređaj formira različite setove izlaznih podataka, koji se mogu koristiti u zavisnosti od potrebe: GPGGA (Global Positioning System Fix Data), GPGLL (Geographic position, latitude / longitude), GPRMC (Recommended minimum specific GPS/Transit data), GPVTG (Track made good and ground speed), GPGSA (GPS DOP and active satellites), GPGSV (GPS Satellites in view) (Tabela 39).

Tabela 39 Primer setova izlaznih podataka iz GPS prijemnika

\$GPGGA,113453,4447.87946,N,02029.68528,E,1,11,23.5,261.7,M,-38.3,M,,*5F
\$GPGLL,4447.87946,N,02029.68528,E,113453,A*24
\$GPRMC,113453,A,4447.87946,N,02029.68528,E,0.29,132.6,060215,0.0,E*45
\$GPVTG,132.6,T,132.6,M,0.29,N,0.53,K*43
\$GPGSA,A,2,23,10,07,20,09,06,03,08,,,,,97.5,23.4,94.6*07
\$GPGSV,3,1,11,23,56,000,38,10,51,000,28,07,51,000,28,20,86,000,33*78

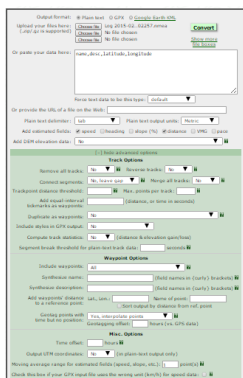
S obzirom da je svrha korišćenja GPS uređaja pokušaj utvrđivanja karakteristika brzine kretanja vozila, u obzir su dolazili setovi izlaznih podataka koji u sebi sadrže podatak o brzini, što je slučaj sa GPRMC i GPVTG setom podataka. Kao primer jednog od setova podataka u tabeli 40 prikazan je sadržaj formata GPRMC, koji pored neophodnog podatka o brzini sadrži i podatke o georeferenciranosti prijemnika.

Tabela 40 Sadržaj seta izlaznih podataka GPRMC

RB	Naziv parametra
1	UTC (Coordinated Universal Time) u formi sat:minut:sekund
2	Status prijemnika (A- spreman za rad, V- upozorenje)
3	Latituda pozicije (u formi stepen, minut sa preciznošću na tri decimale)
4	Latituda hemisfere (severna ili južna)
5	Longituda pozicije (u formi stepen, minut sa preciznošću na tri decimale)
6	Longituda hemisfere (zapad ili istok)
7	Brzina kretanja (u čvorovima)
8	Kurs kretanja (0-360 stepeni u odnosu na sever)
9	UTC datum (u formi dan, mesec, godina)
10	Magnetna varijacija (0-180 stepeni)
11	Smer magnetne varijacije (istok ili zapad)

⁴ 1 čvor – 1,1507 km/h

Pomenuti format sadrži i podatke koji nisu od značaja za konkretno istraživanje i u cilju jednostavnijeg prikaza ciljanih izlaznih podataka korišćen je sajt GPSvisualizer (<http://www.gpsvisualizer.com>). Preko ovog sajta izlazni podaci su konvertovani u potreban format (Slika 18).



type	date	time	latitude	longitude	altitude (m)	speed (km/h)	course	distance (km)	distance interval (m)	sat	hdop	fix
T	06/02/2015 00:00	11:34:49	44.79798	20.4947548	261.7	0.2	254.7	0		4	5.2	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:50	44.79798	20.494754	261.7	0.6	122.9	0.001	0.61	11	6	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:51	44.79799	20.4947535	261.7	0.3	283.2	0.001	0.5	11	4.2	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:52	44.79799	20.494753	261.7	0.1	28.1	0.002	0.43	11	5.1	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:53	44.79799	20.4947547	261.7	0.5	132.6	0.002	0.18	11	4.2	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:54	44.79799	20.4947568	261.7	0.3	182.6	0.002	0.17	4	3.2	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:55	44.79799	20.494758	261.7	0.8	189.5	0.002	0.21	11	5.5	1
T	06/02/2015 00:00	11:34:56	44.79799	20.4947598	261.7	0.5	178.4	0.002	0.3	11	6.5	1

Slika 18 Izlazni podaci konvertovani uz pomoć sajta GPSvisualizer

Pored osnovnih podataka format sadrži i podatke o broju satelita (sat) i dilataciju horizontalne preciznosti (hdop).

Kao drugi merni uređaj u istraživanjima korišćen je radar za snimanje brzine Bushnell® Velocity™. Osnovne karakteristike radara su:

Preciznost (mph; kmh)	+/- 1mph; +/- 2kmh
Udaljenost od vozila	do 400m

Radar za snimanje brzine je korišćen u svrhu formiranja većeg uzorka izmerenih srednjih vremenskih brzina vozila, jer nisu sva vozila u saobraćajnom toku posedovala GPS prijemnike. Upotreba radara je posebno značajnu ulogu imala kod utvrđivanja brzine slobodnog toka. Radar je bio pozicioniran tako da beleži trenutnu brzinu kretanja vozila na otprilike pređene dve trećine dužine segmenta od prelaska zaustavne linije na RAS1 i da učesnicima u saobraćaju ne pruži informaciju o tome da se njihova brzina snima, kako bi se ponašali uobičajeno.

4.3.3. Uzorak istraživanja

Uzorak se odnosio na broj snimljenih prolazaka vozila duž analizirane deonice. Kada je reč o snimcima kamera, zabeleženo i obrađeno je 4385 prolazaka vozila pod različitim vremenskim prilikama. Detaljnom analizom su iz ukupnog broja

prolazaka eliminisani prolasci za koje je primećeno da u značajnoj meri odstupaju od uobičajenog ponašanja. Konačnu bazu je činilo 2876 prolazaka vozila u različitim vremenskim prilikama. Vozilom, koje je bilo opremljeno GPS prijemnikom zabeleženo je preko 100 prolazaka deonicom u različitim vremenskim prilikama, a radarom je zabeležena brzina kretanja od oko 200 vozila.

Snimci sa kamera su iskorišćeni u cilju dobijanja podataka o vremenu prolaska vozila deonicom u različitim vremenskim prilikama, dok su podaci sa GPS prijemnika i radara za snimanje brzine korišćeni u cilju analize karakteristika brzine kretanja vozila deonicom.

Beleženje karakteristika kretanja vozila uz pomoć GPS prijemnika i podaci snimljeni radarom prvenstveno su bili fokusirani na utvrđivanje karakteristika vezanih za brzinu slobodnog toka.

Analiza promena brzine pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika snimana je na jednoj lokaciji (jedna deonica). Kroz pregled literature se može videti da ovakav pristup nije neuobičajen, ali postoji i veliki broj istraživanja koji je podrazumevao dosta veći broj deonica. Pretpostavka autora je da se brojem dodatnih lokacija na kojima bi se istraživanje sprovelo ne bi u velikoj meri doprinelo kvalitetu istraživanog parametra. Svaka deonica ulične mreže ima svoje specifičnosti, a cilj istraživanja je usmeren na analizu izolovanog uticaja samo jedne vrste uticajnog faktora, nepovoljnih vremenskih prilika. Sa druge strane, ograničavajuću okolnost predstavljala je pozicija i postojanje jedne meteorološke stanice sa koje su se prikupljali podaci u karakteristikama vremenskih prilika. U svakom slučaju, definisana metodologija i formirane baze podataka omogućile su donošenje zaključaka vezanih za uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila.

4.3.4. Način obrade prikupljenih podataka

Analiza osetljivosti brzine kretanja vozila pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika sastoji se iz nekoliko koraka. U prva dva koraka, brzina kretanja vozila će

biti analizirana indirektno, na osnovu podataka o prosečnom vremenu prolaska vozila duž analizirane deonice, dok će u trećem koraku biti direktno analizirana.

Korak 1:

U okviru ovog koraka analizirano je vreme prolaska vozila koja u nizu (plotunu) prolaze analiziranu deonicu u različitim vremenskim prilikama. Pod plotunom se podrazumeva niz vozila koji se formira na ulaznoj raskrsnici posmatranog segmenta (u ovom slučaju RAS1) i nakon aktiviranja zelenog signalnog pojma niz vozila (plotun) počinje da se kreće ka narednoj raskrsnici (u ovom slučaju RAS2). Pod vremenom prolaska podrazumevano je vreme od trenutka prelaska zadnje osovine vozila preko zaustavne linije na RAS1, do trenutka prelaska zadnje osovine vozila preko zaustavne linije na RAS2. U konkretnom slučaju nisu uzimani u obzir vremenski gubici vozila na raskrsnici. Usled različitog ponašanja učesnika u saobraćajnom toku često dolazi do disperzije plotuna. Istraživanje disperzije plotuna zahteva posebnu analizu koja ovim istraživanjem nije obuhvaćena.

Osnovni cilj u ovom koraku je da se istraži promena u vremenu prolaska deonice od strane vozila koja se kreću u nizu (plotun ili deo plotuna) pod uticajem različitih vremenskih prilika. Analizirano je vreme prolaska vozila čija je početna brzina kretanja $V_0=0$, odnosno vozila koja kretanje započinju iz reda. Ideja o analizi kretanja vozila koja u nizu prolaze kroz posmatranu deonicu proistekla je na osnovu analize zabeleženih snimaka. Primećeno je da u pojedinim situacijama pozicija vozila u redu formiranom na RAS1 nije identična rednom broju prolaska vozila preko zaustavne linije na RAS2 nakon rasformiranja reda. To je posledica različitog ponašanja učesnika u saobraćajnom toku. S obzirom da se u toj situaciji, kao dodatna promenljiva, pojavljuje i ponašanje učesnika saobraćajnog toka (ponašanje koje u određenim situacijama odstupa od "uniformnog" ponašanja učesnika u saobraćajnom toku), veoma je teško kvantifikovati udeo uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na takvo ponašanje učesnika.

Pored vremena prolaska deonicom, međusobna interakcija između vozila koja u nizu prolaze deonicu analizirana je i kontrolisanjem intervala sleđenja vozila pri

prolasku preko zaustavne linije na RAS2. Analiza promena intervala sleđenja na RAS2 je imala funkciju izmeritelja promena u interakciji između vozila pod uticajem različitih vremenskih prilika.

Pored beleženja vremena prolaska deonicom uz pomoć video kamera, realizovana su snimanja karakteristika prolaska pojedinih vozila u plotunu uz pomoć GPS uređaja. Tom prilikom korišćena je metoda "plutajućeg vozila" (Turner et al., 1998).

Korak 2:

U okviru drugog koraka, predmet analize je promena vremena prolaska deonicom od strane prvog vozila iz reda formiranog na RAS1. Svesno je prihvaćen rizik da usled individualnih karakteristika ponašanja vozača, postoji verovatnoća da vreme prolaska prvog vozila ne bude merodavno u konkretnoj analizi. Međutim, preovladala je pretpostavka da se kod kretanja prvog vozila u nizu može sa visokom pouzdanošću izolovano posmatrati uticaj nepovoljnih vremenskih prilika, jer je verovatnoća pojave drugih faktora uticaja na kretanje vozila minimizirana. Prvenstveno je eliminisana interakcija sa ostalim učesnicima u saobraćajnom toku.

Korak 3:

U skladu sa definicijom brzine slobodnog toka, analiziran je uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vozilo koje se neometano kreće deonicom željenom brzinom. U ovom slučaju, predmet analize su bila vozila koja na RAS1 pristupaju tokom trajanja zelenog signalnog pojma i neometano prolaze analiziranu deonicu. Dinamika brzine vozila prilikom prolaska deonicom beležena je uz pomoć GPS uređaja.

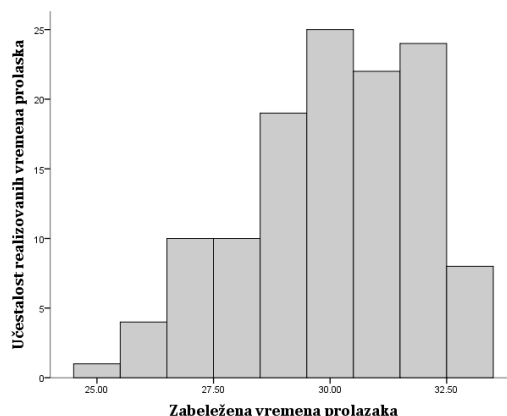
U okviru ovog poglavlja način analize prikupljenih podataka biće prikazan na konkretnom primeru, kao što je to bio slučaj i u prethodnom poglavlju. Primer će podrazumevati analizu navedenih karakteristika brzine kretanja vozila deonicom pod uticajem IVP.

Od ukupnog broja prolazaka vozila snimljenih u idealnim vremenskim prilikama, izdvojen je 321 prolazak vozila koja u nizu prolaze posmatranu deonicu. Podaci su beleženi na nivou sekunde. Imajući u vidu da se i u optimizaciji upravljanja saobraćajem kao jedinica najvećeg stepena detaljnosti uglavnom primenjuje sekunda i u ovom slučaju se odstupilo od manjih mernih jedinica za vreme. Dobijeni rezultati vremena prolazaka kao i intervala sleđenja su analizirani u softveru IBM SPSS Statistics 20.

U narednoj tabeli, i na grafiku su prikazani rezultati analize vremena prolaska vozila (Tabela 41 i Grafik 9)

Tabela 41 Rezultati analize vremena prolaska vozila deonicom

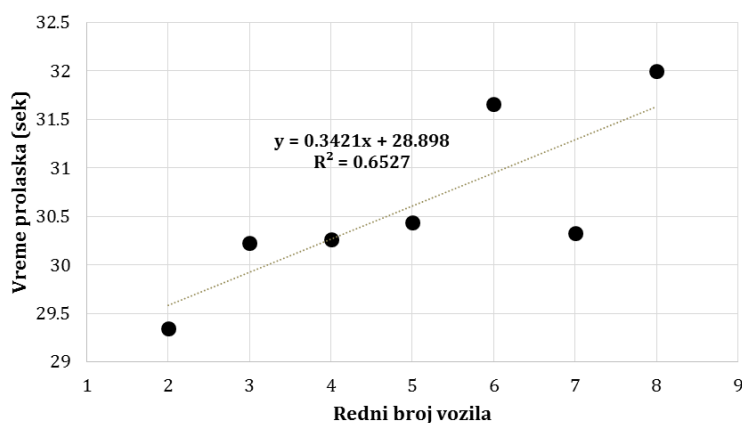
Analizirani parametri	Statistika	Standardna greška
Srednja vrednost (s)	30.03	.168
95% Intervala poverenja oko srednje vrednosti	Donja granica	29.69
	Gornja granica	30.36
Mediana (s)	30.00	
Variansa	3.507	
Standardno odstupanje	1.87	
Minimalna vrednost	25.00	
Maksimalna vrednost	33.00	



Grafik 9 Raspodela zabeleženih vremena prolaska deonicom

Rezultati su pokazali da vremena prolaska vozila u nizu variraju od 25 sekundi do 33 sekunde, s tim što se najveća učestalost vremena prolazaka beleži se od 29 do 32 sekunde. Srednja vrednost vremena prolaska iznosi 30.03 sekunde. Ukoliko bi pretpostavili da se vozilo kretalo konstantnom brzinom duž čitave deonice, što ovde nije slučaj, jer je $V_0=0$, brzina kretanja vozila bi se kretala oko 45.54 km/h.

Analizirajući korelaciju između pozicije vozila u nizu i vremena prolaska deonicom, linearnom regresijom se dobija značajna vrednost koeficijenta determinacije $R^2=0.6527$. Ova vrednost ukazuje na potencijalno postojanje korelacije između pozicije vozila u redu i vremena prolaska deonice, odnosno da se sa porastom rednog broja vozila u nizu povećava i vreme prolaska (Grafik 10).



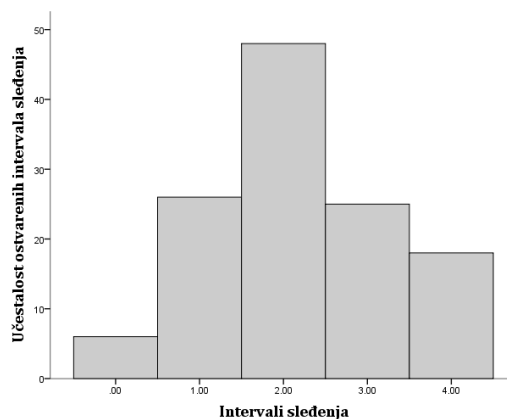
Grafik 10 Pozicija vozila u redu i vreme prolaska deonicom

Kada je reč o zabeleženim intervalima sleđenja vozila na RAS2, u narednoj tabeli su predstavljene karakteristike dobijenih rezultata (Tabela 42).

Tabela 42 Zabeleženi intervali sleđenja vozila u nizu na RAS2

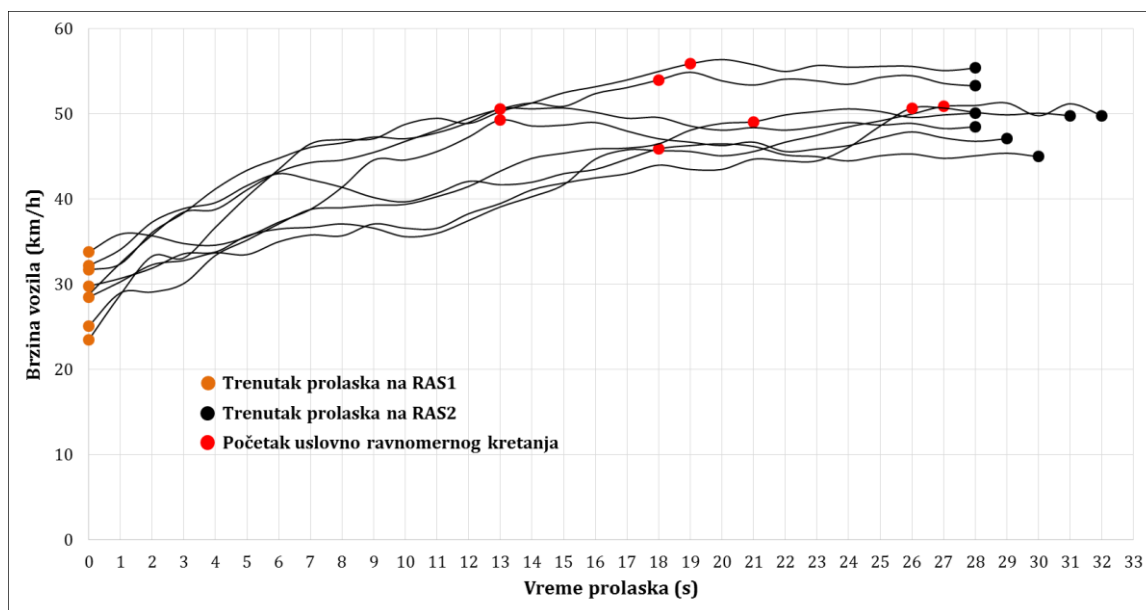
Analizirani parametri	Statistika	Standardna greška
Srednja vrednost	2.18	.097
95% Intervala poverenja oko srednje vrednosti	Donja granica	1.99
	Gornja granica	2.38
Mediana	2.00	
Variansa	1.17	
Standardno odstupanje	1.08	
Minimalna vrednost	.00	
Maksimalna vrednost	4.00	

Iz tabele 42 se vidi da se zabeležene vrednosti intervala sleđenja kreću od 0 do 4 sekunde. Veliki intervali sleđenja od 4 sekunde, u oko 80% slučajeva vezani su ili za drugo vozilo u nizu ili za poslednje vozilo u nizu. Njihovo učešće u ukupnom uzorku je oko 17%. Prosečna vrednost zabeleženih intervala sleđenja iznosi 2.18 sekundi. Na grafiku 11 predstavljena je i raspodela zabeleženih intervala sleđenja iz koje se vidi da je učešće intervala sleđenja od 2 sekunde zastupljeno u najvećoj meri.



Grafik 11 Raspodela intervala sleđenja vozila na RAS2

Analizom vremena prolaska deonice na osnovu snimljene vrednosti vremena u dve presečne tačke (linija zaustavljanja na RAS1 i RAS2) ne dobija se informacija o dinamici kretanja vozila u interakciji sa ostalim učesnicima saobraćajnog toka. Za ovakvu vrstu istraživanja bilo bi poželjno da sva vozila budu opremljena GPS prijemnicima, koji bi na nivou malih vremenskih intervala davali podatke o karakteristikama kretanja vozila duž deonice. Takođe, bio bi poželjan i konstantan video nadzor kako bi se utvrdila priroda eventualnih promena identifikovanih na osnovu podataka dobijenih GPS prijemnikom. Pošto su u okviru ovog istraživanja postojala ograničenja u resursima neophodnim za realizaciju ovakve vrste istraživanja, biće prezentovani rezultati osam merodavnih prolazaka “plutajućeg vozila” opremljenog GPS prijemnikom. Za svaki od prolazaka beležena je pozicija vozila u redu, period ubrzanja, prosečna vrednost ubrzanja, pređeni put do početka relativno ravnomernog kretanja vozila i prosečna brzina uslovno ravnomernog kretanja vozila. Analiza zabeleženih podataka se odnosila na deo trase od zaustavne linije na RAS1 do zaustavne linije na RAS2. Podaci dobijeni sa GPS prijemnika predstavljeni su na sledećem grafiku (Grafik 12).



Grafik 12 Karakteristike kretanja "plutajućeg vozila" pod uticajem IVP

U prethodnim delovima bilo je dosta reči o tome kako u cilju kvalitetne kvantifikacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, sve ostale potencijalne uticaje na promene parametara saobraćajnog toka treba minimizirati. Analizirajući navedene parametre na ovakav način, veoma je teško oceniti udeo uticaja međusobne interakcije vozila saobraćajnog toka na brzinu kretanja u odnosu na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. I pored te činjenice, ova vrsta analize je realizovana. Sa grafika se vidi da postoje razlike i u vremenima prolaska analiziranom deonicom i u dužinama perioda relativno ravnomernog kretanja deonicom, s tim što je disperzija trenutaka uspostavljanja relativno ravnomernog kretanja nešto izraženija. Trenutak uspostavljanja relativno ravnomernog kretanja definisan je kao tačka u kojoj varijacije zabeleženih brzina počinju da se smanjuju. Do te tačke primetan je trend ubrzanja vozila. Usled različitih karakteristika vozila i ponašanja vozača, predmet istraživanja predstavlja brzina pri kojoj vozila u toku otpočinju relativno ravnomerno kretanje, odnosno ostvaruju maksimalnu brzinu kretanja u skladu sa datim okolnostima. Značajno je primetiti da dužina analizirane deonice omogućava vozilima da tokom prolaska ostvare maksimalnu moguću brzinu kretanja pod preovladujućim okolnostima. Kao što se može videti sa grafika ubrzanje nema konstantnu vrednost ali se može oceniti kao kontinualno. U tabeli 43 predstavljeni su rezultati analiziranih karakteristika zabeleženih prolazaka.

Tabela 43 Karakteristike prolazaka "plutajućeg vozila" pod uticajem IVP

Redni broj prolaska	Redni broj vozila u redu	Period ubrzanja (s)	Posebna vrednost ubrzanja (m/s ²)	Pređeni put u fazi ubrzanja (m)	Prosečna brzina relativno ravnornog kretanja (km/h)
1	10	19	0.4	220	54
2	8	16	0.3	160	47.3
3	6	28	0.21	270	50.7
4	6	27	0.23	290	50.2
5	7	19	0.2	210	45.4
6	3	20	0.45	250	55.6
7	4	22	0.3	250	50
8	8	14	0.4	160	49.1

Važno je istaći činjenicu da u ovom slučaju zabeležena vrednost ubrzanja ne kreće od nule jer su karakteristike kretanja vozila analizirane od zaustavne linije a ne od pozicije vozila u redu. Iz tabele se vidi da se ubrzanje kreće u opsegu od 0.2 do 0.45 m/s². Rastojanje koje vozilo pređe od zaustavne linije na RAS1 do trenutka uspostavljanja relativno ravnornog takođe varira u opsegu od 160 do 290 m. Na nivou svih osam prolazaka ovo rastojanje iznosi 226 m. Iako je reč o uzorku od osam prolazaka, koeficijent korelacije od 0.56 potencijalno ukazuje na to da je vozilima sa većom pozicijom u redu manje rastojanje potrebno da bi uspostavili relativno ravnorno kretanje. Slična je situacija i sa periodom ubrzanja u odnosu na poziciju vozila u redu. Ovo je donekle i logično jer ta vozila prelaze veće rastojanje do zaustavne linije. Prosečna vrednost uslovno ravnornog kretanja za svih osam prolazaka, na osnovu zabeleženih vrednosti brzine na nivou sekunde, iznosi 49.1 km/h.

Analizom vremena prolaska prvog vozila u redu duž deonice dobijeno je prosečno vreme prolaska od 28.8 sekundi. Rezultati ove analize predstavljeni su u sledećoj tabeli (Tabela 44).

Tabela 44 Karakteristike prolaska prvog vozila u redu pod uticajem IVP

Analizirani parametri	Statistika	Standardna greška
Srednja vrednost (s)	28.8	0.11
95% Intervala poverenja oko srednje vrednosti	Donja granica	28.27
	Gornja granica	29.36
Mediana (s)	29	
Variansa	4.95	
Standardno odstupanje	2.22	
Minimalna vrednost	24	
Maksimalna vrednost	35	

Iako se iz tabele vidi da maksimalna vrednost vremena putovanja ide do 35 sekundi važno je napomenuti da je učešće tako ostvarenih vremena prolazaka veoma malo. Slična je situacija i sa najmanjim zabeleženim vrednostima vremena prolaska (Tabela 45).

Tabela 45 Procentualno učešće ekstremnih vrednosti vremena prolaska

Vreme prolaska (sekunde)	Procentualno učešće u ukupnom uzorku (%)
35	1,5
34	1,5
33	3
32	3
25	3
24	1,5

Utvrđivanje brzine slobodnog toka na gradskoj uličnoj mreži je dosta je složeniji proces u odnosu na utvrđivanje slobodne brzine na vangradskoj putnoj mreži. Kao što je pomenuto u prethodnom tekstu, uličnu mrežu karakterišu prekinuti saobraćajni tokovi, odnosno postojanje raskrsnica. Neometano kretanje vozila u dužem vremenskom periodu sa najvećom verovatnoćom je moguće realizovati na koordinisanim uličnim pravcima. U suprotnom, dolazi do čestih prekida saobraćajnog toka. Dodatna stvar koja utiče na utvrđivanje brzine slobodnog toka je ograničenje brzine. U opisu brzine slobodnog toka navodi se da ona predstavlja željenu brzinu kretanja vozila. Veoma često, ograničenje brzine u gradskim uslovima onemogućava ostvarenje željene brzine kretanja vozila. Međutim, i pored toga, prisutna je pojava brzina koje prevazilaze postavljena ograničenja, naročito na pravcima koji to omogućavaju. S obzirom da je brzina slobodnog toka veoma važna u procedurama modeliranja saobraćajnog opterećenja modelar često dolazi u dilemu da li brzina slobodnog toka može, odnosno da li sme, da bude veća od ograničenja brzine na uličnoj mreži. Sa jedne strane, ukoliko je tako utvrđeno na terenu, primena utvrđenih vrednosti model će učiniti realnijim, dok sa druge strane modelirati brzinu veću od dozvoljene nije u skladu sa propisima i zakonom.

Istraživanje promena brzine slobodnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika podrazumevalo je obradu i analizu podataka iz dva izvora:

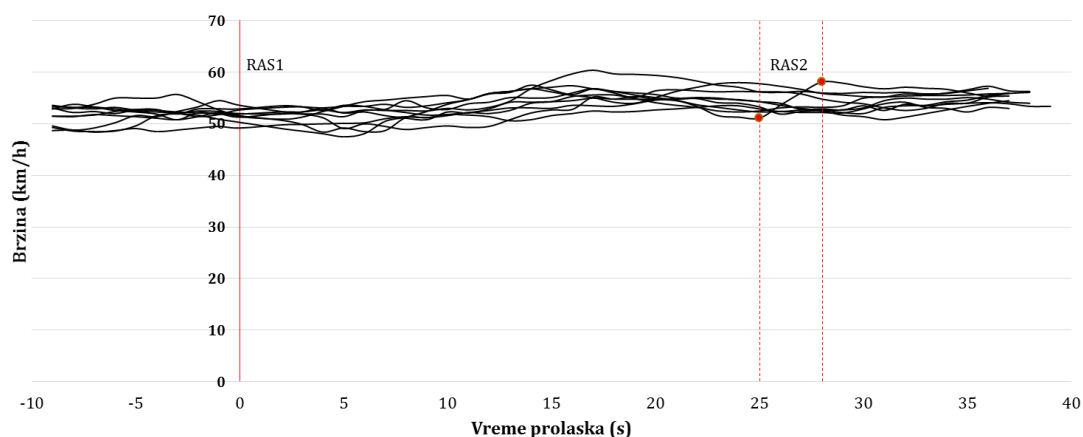
1. GPS prijemnik. Podaci sa GPS prijemnika kojim je bilo opremljeno vozilo koje je u uslovima slobodnog saobraćajnog toka neometano prošlo deonicu.

2. Radar za snimanje brzine. Podaci dobijeni radarom reprezentuju trenutnu, odnosno vremensku brzinu kretanja vozila. Takođe, uzorak je sačinjen od vozila za koje je procenjeno da neometano prolaze analiziranu deonicu.

U smislu kompletnosti dobijenih podataka, beleženje karakteristika prolaska vozila GPS prijemnikom predstavlja najpoželjniji oblik. Na osnovu zapisa dobijenog na ovaj način moguće je videti dinamiku kretanja vozila duž kompletne deonice, vreme prolaska deonicom, kao i trenutnu brzinu kretanja u svakoj sekundi. Podaci dobijeni sa radara za snimanje brzine korišćeni su u cilju formiranja većeg uzorka, iako se na taj način neće dobiti kompletna informacija o karakteristikama brzine kretanja vozila duž deonice.

Kako bi se došlo do podatka o brzini slobodnog toka, obe vrste merenja je bilo potrebno realizovati u vanvršnim časovima, u periodima dana sa malim vrednostima protoka saobraćaja duž posmatrane deonice.

Za razliku od vrednosti vremena prolaska deonice dobijenog sa video snimaka, podaci sa GPS uređaja omogućavaju praćenje dinamike promene brzine. Na narednom grafikonu su prikazani podaci deset merodavnih prolazaka deonicom pod uticajem IVP u uslovima slobodnog toka (Grafik 13)



Grafik 13 Brzina slobodnog toka pod uticajem IVP

Na grafiku su obeleženi trenuci prolaska vozila preko zaustavne linije na RAS1 i RAS2. Prolazak vozila preko prve zaustavne linije je sinhronizovan i objedinjen na nivou sekunde za sve prolaske, dok su varijacije u vremenu prolaska uslovile da na

RAS2 bude predstavljen interval u okviru kog su se realizovali analizirani prolasci. Na x-osi se može uočiti da je prikazana brzina kretanja vozila i 10 sekundi pre prelaska zaustavne linije na RAS1. Pošto su u analizu ušle vrednosti brzine nakon prolaska vozila kroz RAS1, od tog trenutka je vrednostima vremena prolaska na x-osi dodeljena pozitivna vrednost.

Varijacije u vremenima prolazaka se kreću u opsegu od 0 do 3 sekunde, odnosno, zabeležena vremena prolaska variraju od 25 do 28 sekundi. Sa grafika se može uočiti da postoje delovi u kojima brzina na deonici prelazi dozvoljenih 50 km/h. Ova pojava jasnije dolazi do izražaja kada je u pitanju druga polovina deonice. U pojedinim trenucima vrednost brzine dostiže vrednost i od 60 km/h.

U tabeli 46 prikazane su zabeležene vremenske brzine kretanja na oba analizirana preseka deonice (zaustavna linija na RAS1 i RAS2).

Tabela 46 Vremenska brzina kretanja vozila na RAS1 i RAS2 (uticaj IVP)

Redni broj prolaska	Brzina RAS1 (km/h)			Brzina RAS2 (km/h)		
1	53.6	Prosečna vrednost	51.69	51.2	Prosečna vrednost	54.25
2	51.6			53.3		
3	51.9			56.2		
4	49.2	Standardno odstupanje	1.21	52.9	Standardno odstupanje	1.92
5	52.9			54		
6	51.4			52.4		
7	51.3			56.2		
8	52.7			57.3		
9	50.3			53		
10	52			56		

Iz rezultata se vidi da je zabeležena vrednost brzine na RAS2 u 90% slučajeva veća u odnosu na brzinu na RAS1. To se može obrazložiti činjenicom da je na RAS2 reč o pešačkom prelazu sa taster najavom pešaka. Na RAS1 učešće zelenog signalnog pojma, namenjenom vozilima u okviru ciklusa je 40%, dok je kod signalisanog pešačkog prelaza sa tasterom za aktivaciju na RAS2 učešće zelenog signalnog pojma za vozila u okviru ciklusa minimalno 65%, a u određenim situacijama i dosta veće. Na osnovu pomenutog, postoji mogućnost da vozači "ležernije" prolaze kroz RAS2 uz očekivanu manju verovatnoću pojave crvenog signalnog pojma.

U cilju oslikavanja relativno ravnomernog kretanja na istraživanoj deonici na nivou svakog prolaza analiziran je broj procesa usporenja i ubrzanja kao i njihova učestalost (Tabela 47)

Tabela 47 Dinamika promene brzine (V_0 pod uticajem IVP)

Redni broj prolaska	Broj procesa ubrzanja	Opseg ubrzanja (m/s^2)	Broj procesa usporenja	Opseg usporenja (m/s^2)
1	5	0.02 – 0.3	6	0.08 – 0.31
2	4	0.09 – 0.22	4	0.05 – 0.3
3	5	0.07 – 0.21	6	0.03 – 0.24
4	5	0.06 – 0.17	4	0.06 – 0.11
5	4	0.08 – 0.17	5	0.01 – 0.13
6	2	0.14 – 0.16	3	0.14 – 0.2
7	4	0.06 – 0.36	4	0.03 – 0.13
8	4	0.06 – 0.22	4	0.05 – 0.16
9	3	0.03 – 0.31	4	0.1 – 0.25
10	5	0.06 – 0.7	5	0.03 – 0.25

Iz tabele 47 se vidi da je broj ciklusa ubrzanja i usporenja tokom prolaska vozila deonicom ravnomerno raspoređen. Ni u jednom od prolazaka ne oslikava se proces apsolutnog ubrzanja ili usporenja prolaskom analiziranom deonicom već se ti procesi smenjuju. Ukoliko se analiziraju vrednosti usporenja i ubrzanja, vidi se da je reč o relativno malim vrednostima koje se kreću u opsegu od $0.02 m/s^2$ do $0.36 m/s^2$ za proces usporenja, i od $0.03 m/s^2$ do $0.31 m/s^2$ za proces ubrzanja.

Podaci o brzini kretanja vozila sa GPS prijemnika beleženi su na nivou sekunde. Ukoliko se za svaki od prolazaka proračuna prosečna brzina kretanja vozila, na osnovu podatka o brzini dobijenih sa GPS prijemnika (V_{GPS} – prosečna vrednost brzine beležena na nivou svake sekunde), dobijaju se sledeći rezultati (Tabela 48)

Tabela 48 Prosečna vrednost brzine slobodnog toka (uticaj IVP)

Redni broj prolaska	Prosečna vrednost brzine (km/h)	Standardno odstupanje
1	52.1	2.26
2	52.3	2.18
3	54.6	1.68
4	51.7	1.24
5	53.4	0.94
6	54.4	1.89
7	55.4	3.2
8	55	1.68
9	53.4	3.19
10	53	1.39
Prosek	53.5	1.21

Iz tabele se vidi da vrednosti prosečne brzine po prolascima variraju između 51.7 i 55.4 km/h. Zabeležena maksimalna brzina kretanja iznosi 60.4 km/h, dok je

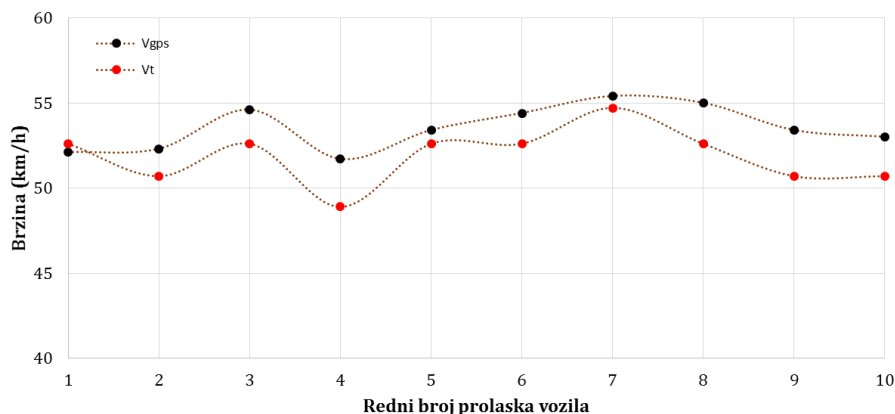
minimalna zabeležena brzina od 47.5 km/h. Prosečna brzina kretanja vozila na osnovu zabeleženih prosečnih vrednosti brzina po prolasku iznosi 53.5 km/h. Ukoliko se proračuna prosečna vrednost brzine na kompletном uzorku na nivou sekunde, dobijena vrednost brzine je identična. U odnosu na propisano ograničenje brzine na analiziranoj deonici, prekoračenje brzine iznosi oko 7%.

Na osnovu podataka sa GPS uređaja jednostavno je izvući vremena svakog analiziranog prolaska vozila deonicom. Rezultati proračuna prosečne brzine kretanja na osnovu trajanja vremena prolaska deonicom (V_t) prikazani su u tabeli 49.

Tabela 49 Prosečna brzina kretanja vozila (uticaj IVP)

Redni broj prolaska	Trajanje vremena prolaska (sek)	Prosečna brzina (km/h)
1	26	52.6
2	27	50.7
3	26	52.6
4	28	48.9
5	26	52.6
6	26	52.6
7	25	54.7
8	26	52.6
9	27	50.7
10	27	50.7
Prosek	26.4	51.9

Na osnovu proračuna brzine na ovakav način, dobijena vrednost na nivou svih prolazaka je nešto manja i iznosi 51.9 km/h. Kada se uporede vrednosti dobijenih brzina proračunatih na ova dva načina može se uočiti da je u većini slučajeva (osim kod prvog prolaska) vrednost prosečne brzine koja je proračunata na nivou sekunde (V_{GPS}) veća (Grafik 14). Razlike se kreću u opsegu od 0.5 do 2.8 km/h. Ovo se može objasniti oscilacijama u brzini kretanja koje u proračunu V_t nisu uzete u obzir.

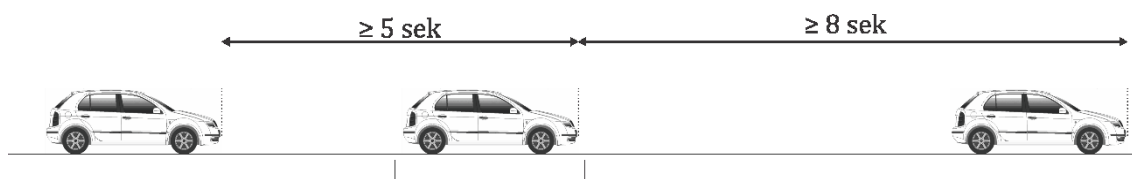


Grafik 14 Usporedna analiza V_{GPS} i V_t

Prethodno realizovana istraživanja u okviru kojih je korišćen GPS prijemnik omogućila su kvalitetno pozicioniranje radara za snimanje brzine. Predmet snimanja brzine na posmatranom preseku deonice predstavljala su vozila za koja je pretpostavljeno da se neometano kreću deonicom bez interakcija sa ostalim učesnicima saobraćajnog toka. Snimanje brzine radarom je realizovano isključivo sa ciljem formiranja većeg uzorka snimljenih brzina slobodnog toka. Pošto je reč o beleženju vremenske brzine kretanja vozila, za proračun brzine slobodnog toka je primenjen jedan od postojećih modela.

Radarom su snimana vozila u isključivo krajnjoj levoj traci, u pravcu kretanja od RAS1 ka RAS2. Pozicija na kojoj su beležene brzine kretanja vozila bila je na oko 240 m od zaustavne linije RAS1. Na ovom rastojanju, čak i u situaciji beleženja brzina kretanja vozila koja iz reda na RAS1 pristupaju analiziranoj deonici dobijeno je da se ostvaruje maksimalna moguća brzina kretanja. Specifičnost kod ovakve vrste istraživanja predstavlja i pozicioniranje radara na takav način da učesnici u saobraćajnom toku ne primete da se njihova brzina beleži. U suprotnom, izmerene vrednosti ne bi oslikavale realnu situaciju.

Na osnovu preporuka, definisanih u priručniku HCM iz 2010. godine, kriterijumi za utvrđivanje slobodne brzine vozila su prikazani na slici 19.



Slika 19 Kriterijumi za utvrđivanje slobodne brzine (HCM 2010)

Sa slike 19 se vidi da je slobodnu brzinu kretanja vozila moguće utvrditi ako interval sleđenja sa prethodnim vozilom iznosi minimalno 8 sekundi, a interval sleđenja sa narednim vozilom iznosi minimalno 5 sekundi. Možda se ovi kriterijumi mogu protumačiti i kao previše strogi, ali svakako ističu značaj neometanog kretanja vozila. Tokom istraživanja nisu postojale mogućnosti da se za svako vozilo, čija je brzina merena, ispita ispunjenost navedenih kriterijuma, ali se vodilo računa da intervali sleđenja prethodnog i sledbenog vozila budu takvi da prethodno i sledbeno vozilo nemaju uticaja na brzinu kretanja ciljanog vozila. Istraživanja su realizovana u periodima tokom dana sa veoma malim časovnim opterećenjem (rani jutarnji časovi).

Po preporuci HCMa iz 2010. godine, u definisanju brzine slobodnog toka uzorak koji je potreban da se prikupi, trebao bi da bude preko 100 snimljenih brzina vozila. Kada je reč o snimanju brzine slobodnog toka pod uticajem IVP snimljeno je 101 vozilo. U ostalim analiziranim tipovima vremenskih prilika formirani uzorak je bio nešto manji. U narednoj tabeli su prikazane karakteristike zabeleženih brzina vozila (Tabela 50)

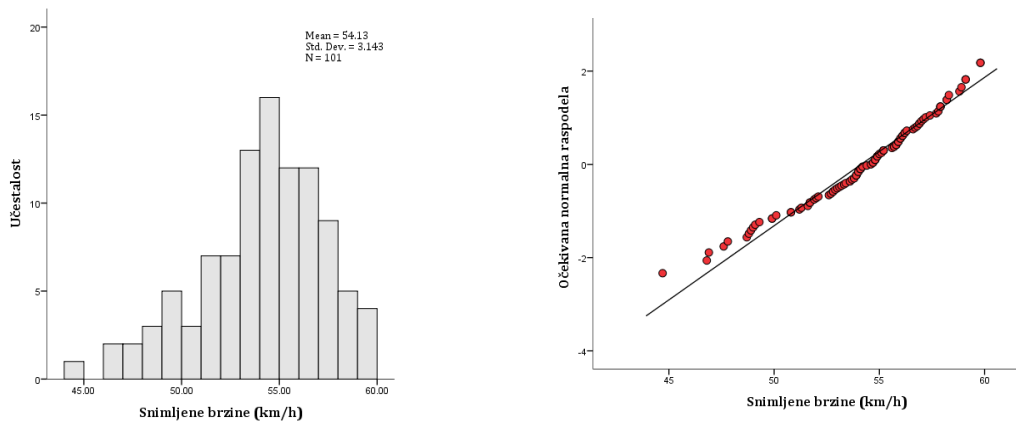
Tabela 50 Karakteristike brzina vozila zabeleženih radarom (uticaj IVP)

Broj snimljenih vozila	Klasa snimljene brzine (km/h)	Broj snimljenih vozila u okviru klase	Na nivou čitavog uzorka	
UTICAJ IVP	40-45	1	Prosečna vrednost (km/h)	54.1
	45-50	12	Mediana (km/h)	54.6
	50-55	46	Standarno odstupanje	3.14
	55-60	42	Opseg snimljenih brzina (km/h)	44.7 – 59.8

Interesantno je da je testiranjem normalnosti raspodele Smirnov-Kolmogorov testom potvrđena hipoteza o normalnosti raspodele analiziranih podataka (Tabela 51 i Slika 20)

Tabela 51 Testiranje normalnosti raspodele brzina zabeleženih radarom

	Kolmogorov-Smirnov		
	Statistic	df	Sig.
Snimljene brzine	.086	101	.063



Slika 20 Testiranje normalnosti raspodele brzina zabeleženih radarom

Po preporukama HCMa iz 2010. godine dobijeni podaci o snimljenoj srednjoj vremenskoj brzini kretanja, iskorišćeni su za proračun brzine slobodnog toka (Highway capacity manual, 2010).

$$V_{sl} = V_{sv} - \frac{\sigma_{sv}^2}{V_{sv}}$$

V_{sl} – brzina slobodnog toka (km/h)

V_{sv} – snimljena srednja vremenska brzina (km/h)

σ_{sv} – standardno odstupanje V_{sv}

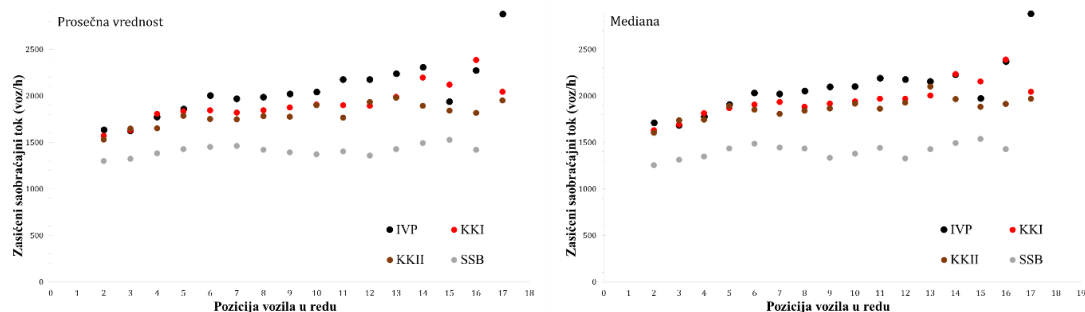
Na osnovu predstavljenog obrazca, brzina slobodnog toka za suvo vreme iznosi 53.9 km/h. Vrednost proračunate brzine slobodnog toka je u ovom slučaju nešto veća od brzina slobodnog toka koja je utvrđena na osnovu podataka sa GPS prijemnika. Dobijena mala razlika, govori u prilog pouzdanosti utvrđene vrednosti slobodne brzine kretanja.

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Ovo poglavlje je posvećeno analizi i sintezi dobijenih rezultata istraživanja. Rezultati su sistematizovani na način kako je definisano u okviru metodologije istraživanja. U prvom delu će biti reči o rezultatima istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na vrednost zasićenog saobraćajnog toka, dok je drugi deo posvećen rezultatima ispitivanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila.

5.1 OSETLJIVOST KAPACITETA NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA

Uporedna analiza vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, u odnosu na analizirane kategorije nepovoljnih vremenskih prilika, realizovana je na svakoj od definisanih raskrsnica. Na grafikonima je prikazana uporedna analiza rezultata istraživanja na Lokaciji I. Prikazani su rezultati obe metode proračuna, i prosečnih vrednosti i medijane (Grafik 15a i Grafik 15b).

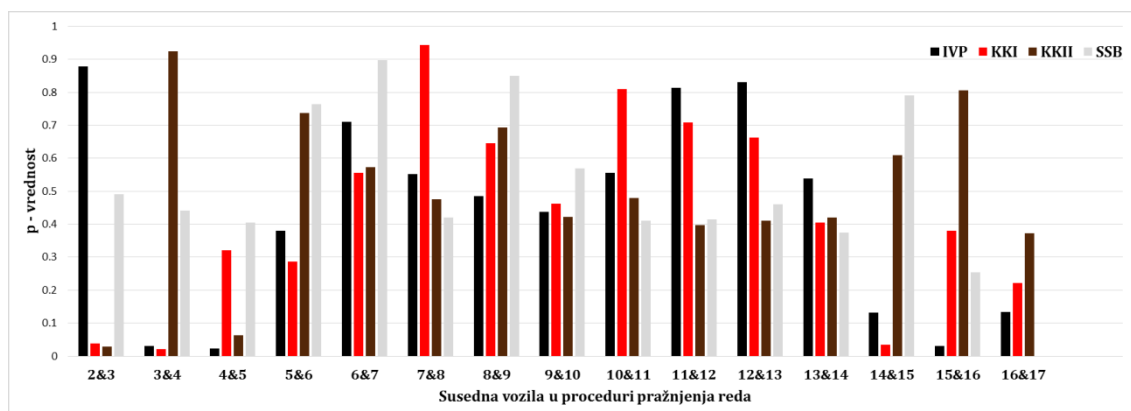


Grafik 15 Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na nivou pozicije vozila u redu, procečna vrednost (a) i mediana (b)

Sa grafikona se vidi da vrednosti zasićenog saobraćajnog toka istraživani pod uticajem SSB u znatnoj meri odstupaju u odnosu na ostale izmerene vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Imajući u vidu da je reč o „ekstremnoj“ pojavi, i očekivalo se da uticaj na smanjenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka bude značajan. Sa druge strane, kada je reč o rezultatima uticaja različitih kategorija kiše, dobijeni rezultati ukazuju da se intenzitet kiše može povezati sa intenzitetom smanjenja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Međutim, na nivou pozicije

vozila u redu postoje i izuzeci. Na primer, sa grafika 15b se može primetiti da vrednost zasićenog saobraćajnog toka za trinaesto vozilo u redu pod uticajem KKII ima veću vrednost od zabeležene vrednosti pod uticajem KKI. Navedeni slučaj se može okarakterisati malom verovatnoćom pojave.

Kao što je obrazloženo u metodologiji istraživanja, vrednost zasićenog saobraćajnog toka je utvrđivana na osnovu prosečnih vrednosti i medijana intervala sleđenja merodavnog niza vozila. Za svaku od analiziranih vrsta nepovoljnih vremenskih prilika Man Whitney U testom je definisan merodavan niz vozila, na osnovu nivoa sličnosti u intervalima sleđenja susednih vozila. Rezultati utvrđivanja merodavnog niza vozila za Lokaciju I prikazani su na grafiku 16.



Grafik 16 Rezultati Man Whitney U testa sličnosti intervala sleđenja susednih vozila

Na grafiku su prikazani rezultati analize sličnosti intervala sleđenja susednih vozila za svaku od analiziranih kategorija vremenskih prilika. Na osnovu dobijenih p -vrednosti nije bilo moguće uspostaviti jedinstveni kriterijum za veličinu p -vrednosti kao kriterijum za pripadnost merodavnom nizu vozila. Prioritet je bio utvrditi posle kojih intervala sleđenja u pražnjenju reda dolazi do značajnih oscilacija u p -vrednosti. Vodeći se time kao osnovnim kriterijumom, merodavni nizovi vozila su formirani iza trećeg, četvrtog i petog vozila u redu u zavisnosti od lokacije i analiziranih vremenskih prilika. Dužine merodavnih nizova vozila su takođe varirale. Utvrđivanje konkretnih razloga varijacije u definisanim merodavnim nizovima vozila zahtevalo bi posebno istraživanje. Grafička interpretacija dobijenih vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na

poziciju vozila u redu na ostalim analiziranim lokacijama data je u prilogu (Prilog IV).

Primenom razvijene metodologije na svakoj od analiziranih raskrsnica je proračunata vrednost zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na definisane kategorije vremenskih prilika (Tabela 52).

Tabela 52 Redukcija zasićenog saobraćajnog toka pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika

		Lokacija I		Lokacija II		Lokacija III		Lokacija IV	
IVP	Metoda proračuna	Mediana	Prosečna vrednost	Mediana	Prosečna vrednost	Mediana	Prosečna vrednost	Mediana	Prosečna vrednost
		Zasićeni saobraćajni tok	2008	1968	1925	1885	2045	2034	2057
KKI	Zasićeni saobraćajni tok	1892	1860	1836	1827	1925	1920	2011	1949
	Promena (%)	5.8	5.5	4.6	3	5.8	5.6	2.2	3.7
KKII	Zasićeni saobraćajni tok	1837	1809	1749	1739	1809	1791	1856	1837
	Promena (%)	8.6	8	9.1	7.7	11.5	11.9	9.8	9.2
SSB	Zasićeni saobraćajni tok	1420	1415	N/M	N/M	1290	1287	N/M	N/M
	Promena (%)	29	28	-	-	37	36.7	-	-

N/M – nije mereno

Dobijeni rezultati istraživanja pokazuju značajnu osetljivost promene vrednosti zasićenog toka pod uticajem kiše. Kada se procedura proračuna izvodi preko prosečnih vrednosti, kao i kada je reč o proračunu medijana, primetna su smanjenja u odnosu na vrednost zasićenog toka utvrđenu u idealnim vremenskim prilikama. S obzirom da je metodološki opredeljeno da se svaka raskrsnica analizira posebno, ukoliko se pogledaju rezultati dobijeni preko proračuna prosečne vrednosti intervala sleđenja, smanjenje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka pod uticajem KKI kreće od 3 do 5.5%. Za slučaj proračuna medijane smanjenje se kreće od 2.2 do 5.8%. Smanjenje pod uticajem KKII po proračunu prosečne vrednosti kreće se u granicama od 7.7 do 11.9%, dok se smanjenje proračunom medijana kreće od 8.6 do 11.5%. Takođe, uticaj SSB doveo je do smanjenja

vrednosti zasićenog saobraćajnog toka koje se za proračun prosečne vrednosti kreće od 28 do 36.7%, dok se po proračunu mediana smanjene kreće između 29 i 37%. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je intenzitet nepovoljnih vremenskih prilika u korelaciji sa intenzitetom uticaja na promenu vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Ova konstatacija je u skladu sa jednom od postavljenih hipoteza, odnosno potvrđuje je. Posmatrajući rezultate uticaja SSB, može se zaključiti da i od tipa nepovoljnih vremenskih prilika zavisi intenzitet uticaja na analizirani parametar, što takođe potvrđuje jednu od postavljenih hipoteza.

Kako je objašnjeno u metodologiji, istraživanja su realizovana jednovremeno, ali su i pored toga dobijena odstupanja u vrednostima promene zasićenog saobraćajnog toka posmatrajući analizirane lokacije. Obrazloženje za dobijena odstupanja može se naći u:

- različitim karakteristikama analiziranih raskrsnica (tehničkim i eksploatacionim), položaju saobraćajne trake u odnosu na ostale saobraćajne trake na prilazu, nameni ostalih saobraćajnih traka na analiziranom prilazu i ostalom.
- promenljivosti prostorne komponente vremenskih prilika, u kontekstu intenziteta. Sa tim u vezi, treba imati u vidu i da su intenziteti kategorija analiziranih nepovoljnih vremenskih prilika definisani u opsegu i nemaju ekzaktnu vrednost.

Poredeći vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, koje su dobijene proračunom prosečnih vrednosti i medijana, primećuje se da je u svakoj analiziranoj situaciji vrednost zasićenog toka, dobijena medijanom, veća od vrednosti dobijene proračunom proseka. Međutim, u odnosu na svrhu ovog istraživanja, razlike se ne mogu oceniti kao značajne. U cilju opredeljivanja koji od dve vrste proračuna daje merodavnije rezultate potrebno je sprovesti opsežnija istraživanja i detaljniju analizu.

5.1.1. Koeficijenti osetljivosti kapaciteta

Imajući u vidu dobijene rezultate, osetljivost kapaciteta ulične mreže na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika mogla bi da se implementira u standardni obrazac za proračun kapaciteta saobraćajne trake na signalisanoj raskrsnici:

$$K = S \cdot \frac{g}{C}$$

K – kapacitet saobraćajne trake (voz/h)

S – zasićeni saobraćajni tok (voz/h)

g – dužina trajanja zelenog signalnog pojma (sek)

C – dužina trajanja ciklusa (sek)

U standardni obrazac bi se trebao implementirati *koeficijent osetljivosti kapaciteta* u odnosu na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. Utvrđeni koeficijent osetljivosti kapaciteta smanjuje baznu vrednost zasićenog saobraćajnog toka koja je utvrđena u idealnim vremenskim prilikama.

U ovom slučaju, koeficijenti osetljivosti kapaciteta su označeni sa α_1 , α_2 i α_3 , odnosno koeficijent osetljivosti kapaciteta pod uticajem KKI, koeficijent osetljivosti kapaciteta pod uticajem KKII i koeficijent osetljivosti kapaciteta pod uticajem SSB, respektivno. U zavisnosti od tipa vremenskih prilika, za koji se želi izvršiti proračun kapaciteta, obrazac dobija izmenjeni oblik:

$$K = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \cdot S \cdot \frac{g}{C}$$

Istraživanja za ovdašnje lokalne uslove su utvrdila da se vrednost koeficijenta α_1 , ne uzimajući u obzir metodu proračuna, kreće u opsegu od 0.97 do 0.94, vrednost koeficijenta α_2 se kreće od 0.92 do 0.88, dok se vrednost koeficijenta α_3 kreće od 0.72 do 0.63 (Tabela 53).

Tabela 53 Koeficijenti osetljivosti kapaciteta

Kategorija nepovoljnih vremenskih prilika	Koeficijent osetljivosti kapaciteta
α_1 (KKI)	0.97 - 0.94
α_2 (KKII)	0.92 - 0.88
α_3 (SSB)	0.72 - 0.63

Na osnovu dobijenih rezultata zabeleženo je značajno odstupanje u vrednostima zasićenog saobraćajnog toka pod uticajem SSB. Kako je i istaknuto u prethodnom tekstu, ovaj tip nepovoljnih vremenskih prilika, imajući u vidu karakteristike i učestalost pojave, može se svrstati u "ekstremne" vremenske prilike. S obzirom da je svrha ovog istraživanja, implementacija faktora uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja, veoma mala verovatnoća pojave SSB će eliminisati analizu ovog uticaja iz daljeg istraživanja.

5.2 OSETLJIVOSTI BRZINE KRETANJA VOZILA NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA

Prilikom istraživanja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila predstavljena metodologija je u potpunosti primenjena za analizirane kategorije nepovoljnih vremenskih prilika.

5.2.1. Osetljivost brzine vozila koja u nizu prolaze deonicu

Prvi korak u analizi uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja podrazumevao je analizu brzine kretanja vozila koja u nizu prolaze analiziranu deonicu. Važno je napomenuti da je iz analize izuzeto prvo vozilo u redu, i da su analizirana vremena prolazaka vozila za koje je utvrđeno da istim redosledom prolaze preko zaustavne linije na RAS1 i RAS2.

U tabeli 54 prikazana je uporedna analiza dobijenih rezultata istraživanja za vremena prolazaka vozila u nizu pod uticajem različitih vremenskih prilika.

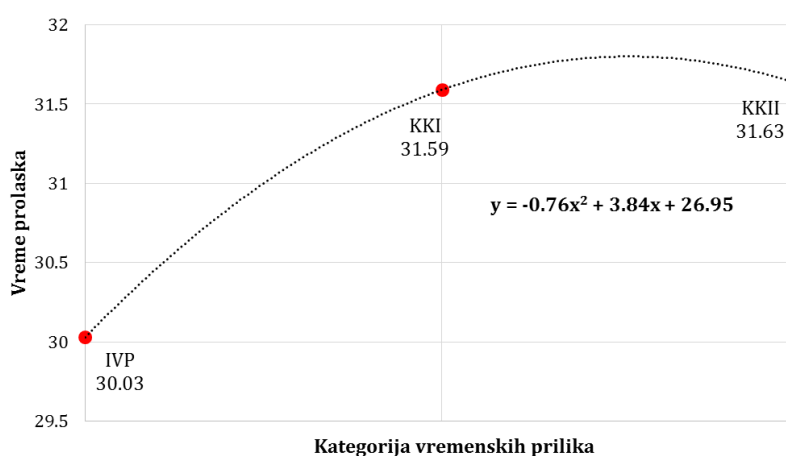
Tabela 54 Uporedna analiza prosečnih vremena prolazaka vozila u nizu

	IVP	KKI	KKII
Srednja vrednost vremena prolaska (s)	30.03	31.59	31.63
Standardno odstupanje	1.87	2.01	2.44
Minimalna vrednost (s)	25	26	24
Maksimalna vrednost (s)	33	36	36

Prosečna vremena prolazaka vozila koja u nizu prolaze analiziranu deonicu, povećavaju se sa pogoršanjem vremenskih prilika, ali su zabeležene razlike relativno male. Standardno odstupanje je najveće kod prosečnog vremena kretanja vozila pod uticajem KKII. Primećeno je, da najveće učešće u oscilacijama vremena

prolazaka vozila koja u nizu prolaze posmatranu deonicu, uzima drugo vozilo u redu. Izraženija razlika je zabeležena između vremena prolaska vozila pod uticajem KKI u odnosu na IVP (1.56 s), dok su prosečna vremena prolaska vozila u nizu pod uticajem KKI i KKII praktično identična.

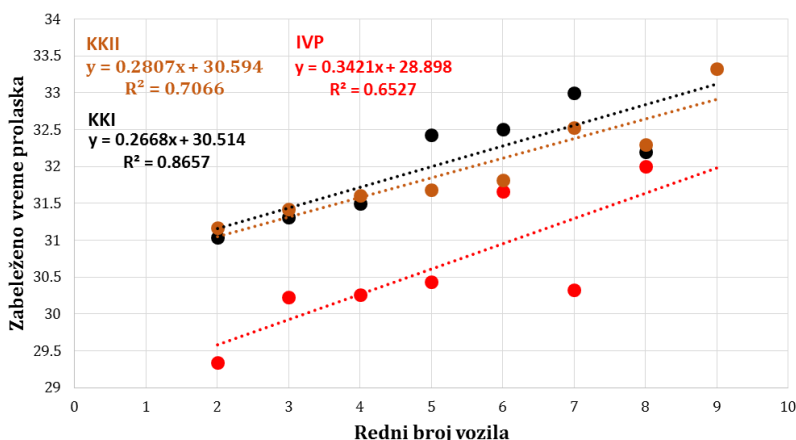
Pri analiziranju dobijenih rezultata treba imati u vidu prisustvo uticaja međusobne interakcije učesnika saobraćajnog toka na vreme prolaska. To u znatnoj meri otežava kvantifikaciju izolovanog uticaja vremenskih prilika. Pretpostavka je da je inicijalni udeo uticaja interakcije između vozila u saobraćajnom toku na vreme prolaska deonicom približno sličan i da se u zavisnosti od karakteristika vremenskih prilika taj uticaj menja. Dobijene razlike se kreću od 1.56 do 1.6 sekundi, što je izraženo u procentima oko 5%. Razlika u medianama zabeleženih vremena prolazaka pod uticajem KKI i KKII u odnosu na suvo vreme iznosi 2 sekunde u oba slučaja (oko 6.6%). Na grafiku 17 prikazana je vizuelna interpretacija dobijenih rezultata.



Grafik 17 Prosečne vrednosti vremena prolazaka vozila u nizu

Sa grafika se vidi da vreme prolaska ne raste linearno sa promenom nepovoljnih vremenskih prilika, iako je u pitanju isti oblik vremenskih prilika koje se razlikuju po intenzitetu. Za precizno definisanje funkcije koja bi opisala ovu promenu potrebno je realizovati dodatna istraživanja. Postavlja se pitanje da li bi se i dodatnim istraživanjem utvrdila dovoljno jasna granica između uticaja vremenskih prilika i međusobne interakcije vozila. U ovom slučaju, zakonitost promene je opisana polinomijalnom funkcijom koja je prikazana na prethodnom grafiku.

Ispitivanje korelacije između vremena prolaska i pozicije vozila u redu realizovano je za sve analizirane kategorije vremenskih prilika (Grafik 18)



Grafik 18 Korelacija između vremena prolaska i pozicije vozila u redu

Rezultati su pokazali da u sva tri slučaja postoji korelacija između analiziranih veličina koja se može opisati linearnom regresijom. Vrednosti koeficijenta determinacije kreću se od 0.65 do 0.87. Sa grafika se uočava razlika u vremenima prolaska u zavisnosti od kategorije uticaja vremenskih prilika. Posmatrajući kategorije kiše, razlika je nešto izraženija između petog i sedmog vozila.

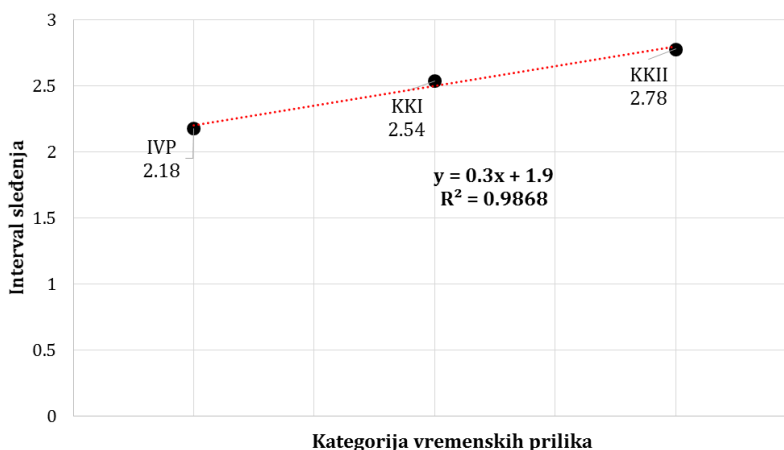
Utvrđivanje udela uticaja vremenskih prilika na karakteristike vremena prolaska vozila u nizu, realizovano je uporednom analizom intervala sleđenja na RAS2. Analizirani su intervali sleđenja vozila u nizu u različitim vremenskim prilikama. U tabeli su prikazani dobijeni rezultati (Tabela 55)

Tabela 55 Prosečne vrednosti intervala sleđenja vozila u nizu na RAS2

	IVP	KKI	KKII
Srednja vrednost intervala sleđenja(s)	2.18	2.54	2.78
Standardno odstupanje	1.08	1.2	1.3
Minimalna vrednost (s)	0	1	1
Maksimalna vrednost (s)	4	5	6

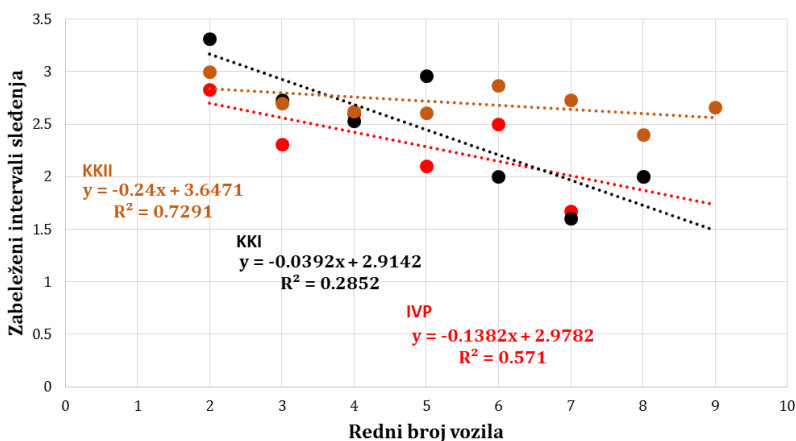
Iz tabele 55 se može primetiti da su za analizirane kategorije uticaja vremenskih prilika dobijene različite vrednosti intervala sleđenja vozila na RAS2. Vrednosti dobijenih intervala sleđenja kreću se od 2.18 do 2.78 sekundi. Ukoliko se uzmu u obzir i maksimalne vrednosti zabeleženih intervala primećuje se da veličina intervala sleđenja raste sa intenzitetom uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Za razliku od vremena prolaska, dobijene vrednosti intervala sleđenja u odnosu na

analiziranu kategoriju vremenskih prilika mogu se opisati linearnom regresijom. Koeficijent determinacije u ovom slučaju ima vrednost od 0.987, što ukazuje na jaku korelaciju (Grafik 19). Pretpostavka je da se dobijene razlike mogu pripisati uticaju nepovoljnih vremenskih prilika.



Grafik 19 Prosečne vrednosti intervala sleđenja na RAS2

Realizovano je i ispitivanje zavisnosti između zabeleženih intervala sleđenja na RAS2 i pozicije vozila u redu, u okviru svake od analiziranih kategorija vremenskih prilika (Grafik 20).

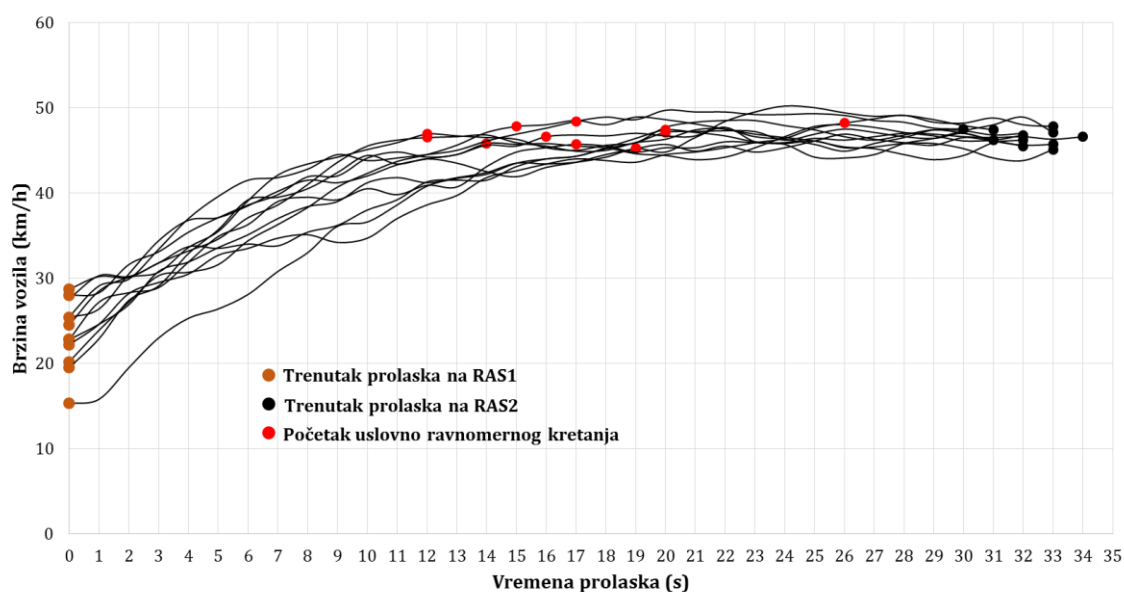


Grafik 20 Zavisnost između prosečnih intervala sleđenja i pozicije vozila u redu

Sa grafika 20 može da se uoči da je u sva tri slučaja prisutna negativna linearna regresija, odnosno, sa porastom pozicije vozila u redu intervali sleđenja se smanjuju. Koeficijenti korelacije su za kategoriju uticaja KKII i suvo vreme nešto veći i iznose 0.72 i 0.57, dok je za uticaj KKI koeficijent determinacije manji i iznosi

0.29. Važno je istaći da veliko učešće u visokim vrednostima intervala sleđenja ima upravo drugo vozilo u redu. Ova pojava se delimično može pripisati i fenomenu “oštrog” starta prvog vozila u redu.

Kada je reč o snimanju karakteristika kretanja vozila, koja iz formiranog reda na RAS1 prolaze analiziranu deonicu, iz baze trasa kretanja vozila pod uticajem KKI koje su zabeležene GPS prijemnikom, izdvojeno je dvanaest merodavnih prolazaka. Karakteristike brzina vozila tokom prolazaka prikazane su na grafiku 21.



Grafik 21 Karakteristike brzine tokom prolaska vozila u nizu pod uticajem KKI (GPS)

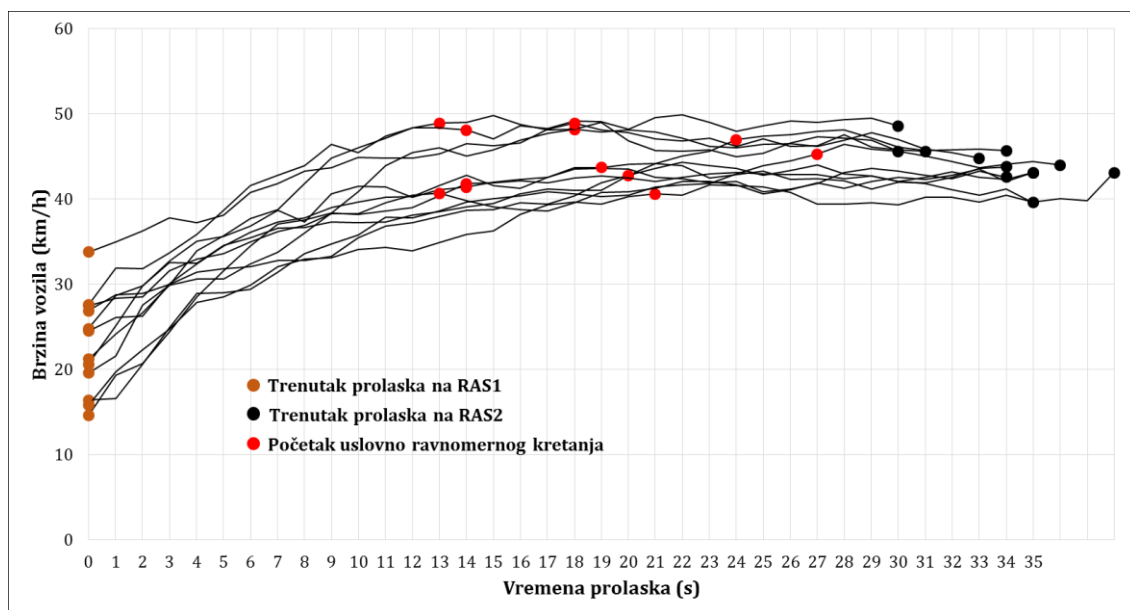
Na grafiku su predstavljene tačke prolazaka zaustavnih linija na RAS1 i RAS2 kao i tačka u kojoj vozilo počinje da se kreće uslovno ravnornomno. Detaljnije karakteristike realizovanih prolazaka predstavljene su u tabeli 56.

Tabela 56 Karakteristike prolazaka vozila pod uticajem KKI

Redni broj prolaska	Pozicija vozila u redu	Period ubrzanja (s)	Posečna vrednost ubrzanja (m/s^2)	Pređeni put u fazi ubrzanja (m)	Prosečna brzina relativno ravnornog kretanja (km/h)
1	3	13	0.48	120	46.8
2	2	21	0.42	190	46.6
3	2	16	0.48	160	46.7
4	3	20	0.31	200	46.1
5	2	20	0.36	200	45.4
6	4	21	0.26	230	46.7
7	8	13	0.38	125	46.3
8	6	15	0.33	160	45.9
9	4	17	0.35	170	48.1
10	4	18	0.35	175	45.7
11	3	27	0.27	270	47.9
12	3	18	0.36	190	48.8

Vreme u kome je zabeleženo kontinualno ubrzanje vozila tokom prolaska deonicom varira od 13 do 27 sekundi. Između perioda ubrzanja vozila i prosečne brzine rlativno ravnornog kretanja zabeležena je niska korelacija od 0.27. Rastojanje nakon kojeg vozilo počinje da se kreće relativno ravnornom varira, i kreće se od 120 do 270 m. Prosečna vrednost ovog rastojanja iznosi oko 182 m. Kao što je pomenuto u analizi prolazaka pod uticajem IVP, ubrzanje prikazano u tabeli mereno je od trenutka prolaska vozila preko zaustavne linije na RAS1, a ne od početne pozicije u redu. Prosečna vrednost brzine u delu prolaska u okviru koga se vozilo kreće relativno ravnornom iznosi 46.7 km/h. Ova vrednost nije dobijena kao prosečna vrednost prosečnih vrednosti brzine predstavljenih u prethodnoj tabeli, već kao prosečna vrednost zabeleženih vrednosti brzine tokom relativno ravnornog kretanja svih snimljenih prolazaka na nivou sekunde.

Na sledećem grafiku predstavljeni su zabeleženi rezultati analizirane brzine kretanja vozila pod uticajem KKII (Grafik 22). I u ovom slučaju je takođe analizirano dvanaest merodavnih prolazaka.



Grafik 22 Karakteristike brzine tokom prolaska vozila u nizu pod uticajem KKII (GPS)

Kao i u prethodnim slučajevima, na grafiku su istaknute značajne tačke za analizu. U tabeli 57 je predstavljena kvantitativna analiza dobijenih rezultata.

Tabela 57 Karakteristike prolazaka vozila pod uticajem KKII

Redni broj prolaska	Pozicija vozila u redu	Period ubrzanja (s)	Posebna vrednost ubrzanja (m/s^2)	Pređeni put u fazi ubrzanja (m)	Prosečna brzina relativno ravnomernog kretanja (km/h)
1	7	25	0.22	225	46.8
2	5	19	0.49	200	46.8
3	6	14	0.42	140	47.2
4	3	15	0.52	155	48.8
5	7	19	0.22	210	46.9
6	4	15	0.3	130	45.5
7	3	21	0.29	200	42.5
8	2	28	0.29	270	44.9
9	8	15	0.38	140	42.6
10	2	22	0.31	190	40.5
11	5	14	0.26	120	41.3
12	6	19	0.28	200	43

Period ubrzanjanja vozila varira od 14 do 28 sekundi, dok se prosečna vrednost ubrzanjanja kreće oko $0.33 m/s^2$. Između prosečne vrednosti ubrzanjanja i prosečne brzine relativno ravnomernog kretanja zabeležena je vrednost koeficijenta determinacije od 0.42. Raspon rastojanja u okviru kojeg je zabeleženo kontinualno ubrzanjanje vozila je identičan prethodno analiziranom slučaju, i kreće se od 120 do 270 m. Prosečna vrednost pomenutog rastojanja i u ovom slučaju iznosi oko 180 m. Prosečna vrednost brzine u delu relativno ravnomernog kretanja vozila pod

uticajem KKII iznosi 44.2 km/h. I ova vrednost je izračunata na isti način kao i u prethodnom slučaju.

Uporedna analiza osnovnih karakteristika vozila opremljenog GPS uređajem, koje iz reda na RAS1 prolazi analiziranom deonicom pod različitim vremenskim prilikama, prikazana je u tabeli 58.

Tabela 58 Uporedna analiza karakteristika prolaska vozila opremljenog GPS uređajem

	IVP	KKI	KKII
Prosečna vrednost ubrzanja (m/s ²)	0.31	0.36	0.33
Prosečno rastojanje ubrzanja (m)	226	182	182
Prosečna brzina relativno ravnomernog kretanja (km/h)	49.1	46.7	44.2

Iz tabele se vidi da različite kategorije vremenskih prilika nisu u velikoj meri uticale na prosečnu vrednost ubrzanja. Međutim, treba imati u vidu da prosečne vrednosti brzina zabeleženih na zaustavnoj liniji na RAS1 iznose 29.2 km/h pod uticajem IVP, 23.5 km/h pod uticajem KKI i 22 km/h pod uticajem KKII. Iako su vrednosti ubrzanja veoma približne, reč je o različitim brzinama kretanja u početnim tačkama analize. Sa grafika se može videti da ni ubrzanje nije mereno iz pozicije $V_0=0$ već od trenutka prolaska zaustavne linije na RAS1. Kada se analizira prosečno rastojanje iskorišćeno za ubrzanje, najveća vrednost rastojanja je zabeležena pod idealnim vremenskim prilikama, dok je u slučaju uticaja KKI i KKII ova vrednost manja. Ovo se može obrazložiti većim neophodnim rastojanjem za ostvarenje veće brzine kretanja, dok su pod uticajem KKI i KKII i brzine manje, pa je samim tim i neophodno rastojanje za njeno ostvarenje manje. U pogledu razlika u ostvarenim brzinama relativno ravnomernog kretanja, razlike između izmerenih brzina u odnosu na kategorije analiziranih vremenskih prilika prilično su ujednačene. Između prosečnih brzina relativno ravnomernog kretanja ostvarenog pod uticajem IVP i KKI razlika iznosi 2.4 km/h, dok razlika u slučaju uticaja KKI i KKII iznosi 2.5 km/h. Jedno od obrazloženja za ovako dobijene rezultate može se naći i u veoma teškoj oceni raspodele učešća uticaja između međusobne interakcije vozila i uticaja vremenskih prilika.

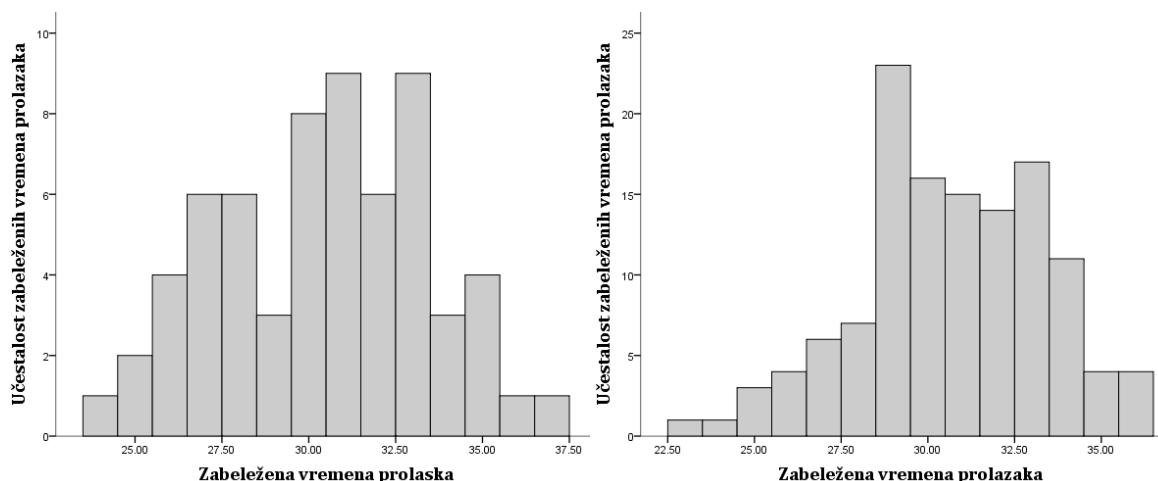
5.2.2. Osetljivost brzine prvog vozila u redu

Na osnovu pretpostavke da prvo vozilo u redu prolazi neometano deonicu u interakciji sa ostalim učesnicima u saobraćaju, analizirana su i vremena prolaska deonicom od strane prvog vozila u redu. Rezultati analize su prikazani u tabeli 59.

Tabela 59 Uporedna vremena prolazaka deonicom od strane prvog vozila

Analizirani parametri	IVP		KKI		KKII	
	Statistika	Standardna greška	Statistika	Standardna greška	Statistika	Standardna greška
Srednja vrednost (s)	28.8	0.11	30.44	0.38	30.67	0.24
95% Intervala poverenja oko srednje vrednosti	Donja granica	28.27	29.68		30.18	
	Gornja granica	29.36	31.2		31.14	
Mediana (s)	29		31		31.00	
Variansa	4.95		9.12		7.35	
Standardno odstupanje	2.22		3.02		2.71	
Minimalna vrednost (s)	24		24		23.00	
Maksimalna vrednost (s)	35		37		36.00	

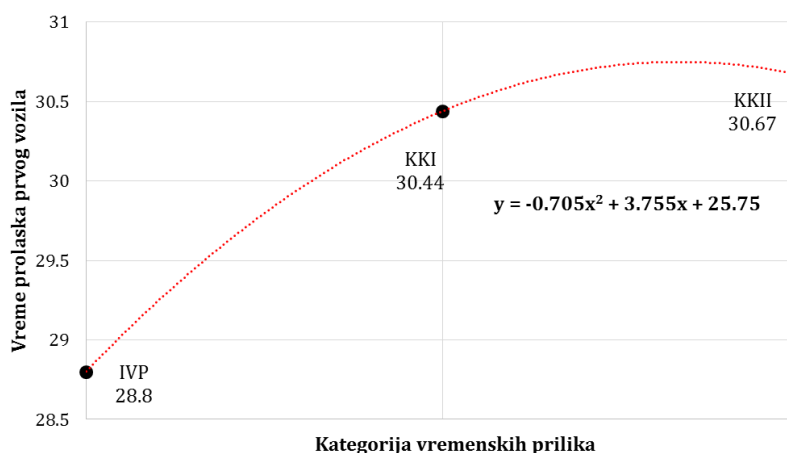
Zabeležene su promene u prosečnom vremenu prolaska pod uticajem različitih vremenskih prilika. Razlike se kreću do 1.87 sekundi, između uticaja IVP i KKII. Na osnovu učestalosti pojave vremena putovanja zabeleženo je ujednačeno učešće većih vremena prolaska u slučaju uticaja KKII, dok su oscilacije u zabeleženim vremenima prolaska nešto izraženije kod uticaja KKI. Raspodele zabeleženih vremena putovanja su prikazane na narednom grafiku (Grafik 23)



Grafik 23 Raspodela učestalosti vremena prolaska prvog vozila (uticaj KKI i KKII)

Vizuelna interpretacija dobijenih rezultata prikazana je na grafiku 24. Imajući u vidu mali broj tačaka kojima je opisana kriva, predstavljena funkcija više govori o

tome da zavisnost promene nije linearna, nego što precizno definiše prirodu promene analiziranih veličina.

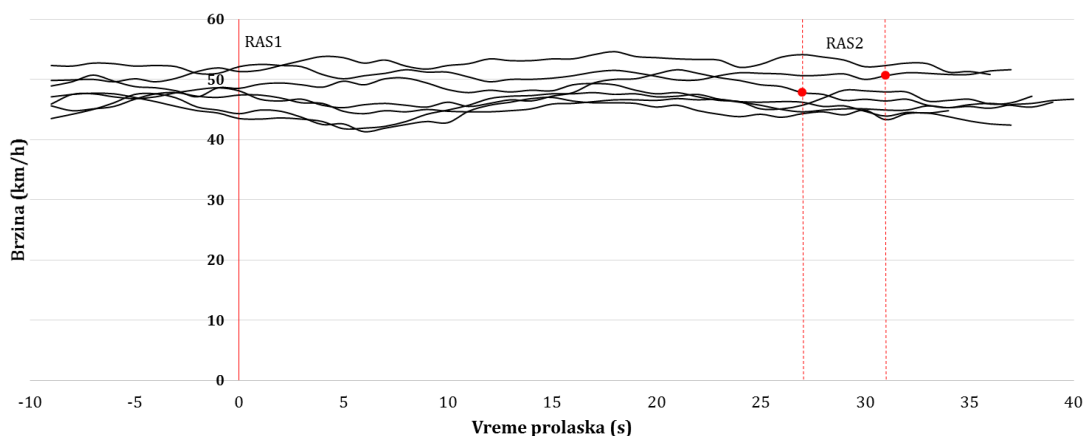


Grafik 24 Prosečna vremena prolazaka prvog vozila u redu

5.2.3. Osetljivost brzine slobodnog toka

Povoljniju situaciju, kod procene uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila, predstavlja merenje uticaja na brzinu kretanja vozila pri malim vrednostima protoka saobraćaja. Na ovaj način minimiziran je uticaj međusobne interakcije vozila, i uz poštovanje kriterijuma navedenih u metodologiji, odstupanja u željenoj brzini kretanja vozila moguće je sa većom verovatnoćom pripisati uticaju nepovoljnih vremenskih prilika.

Na narednom grafiku prikazani su rezultati merodavnih prolazaka vozila slobodnom brzinom pod uticajem KKI (Grafik 25).



Grafik 25 Brzina slobodnog toka pod uticajem KKI

Sa grafika se vidi da u zabeleženim prolascima vozila ne postoje značajne varijacije u ostvarenim brzinama kretanja. Na x-osi označena su vremena prolazaka vozila preko zaustavnih linija na RAS1 i RAS2. U ovom slučaju su takođe zabeležena vremena prolazaka vozila na RAS2, predstavljena u vidu intervala.

Prilikom poređenja ostvarenih prosečnih vremenskih brzina na RAS1 i RAS2 rezultati su prilično izjednačeni i iznose 47.9 i 47.5 km/h, respektivno (Tabela 60).

Tabela 60 Vremenska brzina kretanja vozila na RAS1 i RAS2 (uticaj KKI)

Redni broj prolaska	Brzina RAS1 (km/h)			Brzina RAS2 (km/h)		
1	52.1	Prosečna vrednost	47.9	50.6	Prosečna vrednost	47.5
2	48.5			46.9		
3	47.4			44.7		
4	51.3	Standardno odstupanje	2.98	53.7	Standardno odstupanje	3.15
5	44.3			44.9		
6	43.5			45.1		
7	48.1			46.5		

Na osnovu raspodele procesa usporenja i ubrzanja tokom prolaska vozila deonicom, kretanje se može okarakterisati kao relativno ravnomerno. Vrednosti ubrzanja se kreću u opsegu od 0.03 do 0.28 m/s², dok se usporenje kreće u opsegu od 0.01 do 0.36 m/s² (Tabela 61).

Tabela 61 Dinamika promene brzine (V_0 pod uticajem KKI)

Redni broj prolaska	Broj procesa ubrzanja	Opseg ubrzanja (m/s ²)	Broj procesa usporenja	Opseg usporenja (m/s ²)
1	4	0.09-0.14	4	0.05-0.17
2	8	0.06-0.28	7	0.03-0.22
3	7	0.03-0.14	8	0.01-0.25
4	5	0.08-0.24	4	0.08-0.2
5	8	0.03-0.22	7	0.06-0.36
6	5	0.03-0.14	5	0.03-0.17
7	5	0.08-0.22	6	0.06-0.24

Prosečne vrednosti brzina analiziranih prolazaka i standardna odstupanja predstavljani su u narednoj tabeli (Tabela 62) Prosečne vrednosti brzina po prolascima se kreću od 44.5 km/h do 52km/h. Na osnovu izbora merodavnih prolazaka koji opisuju brzinu slobodnog toka pod uticajem KKI, može se primetiti da je kod jednog od prolazaka (prolazak broj 4) zabeležena nešto veća vrednost prosečne brzine. Iako navedeni prolazak po veličini ostvarene brzine predstavlja izuzetak, u smislu veoma male učestalosti pojave, ipak nije eliminisan iz uzorka i ušao je u proceduru dalje obrade.

Tabela 62 Prosečna vrednost brzine slobodnog toka (uticaj KKI)

Redni broj prolaska	Prosečna vrednost brzine (km/h)	Standardno odstupanje
1	50.9	0.75
2	48.1	1.37
3	45.8	0.9
4	52	0.79
5	44.5	1.45
6	45.3	1.89
7	47.7	1.9
Prosek	47.7	1.29

Prosečna vrednost slobodne brzine kretanja pod uticajem KKI uzimajući u obzir celokupan uzorak zabeleženih vrednosti brzine na nivou jedne sekunde iznosi 47.7 km/h.

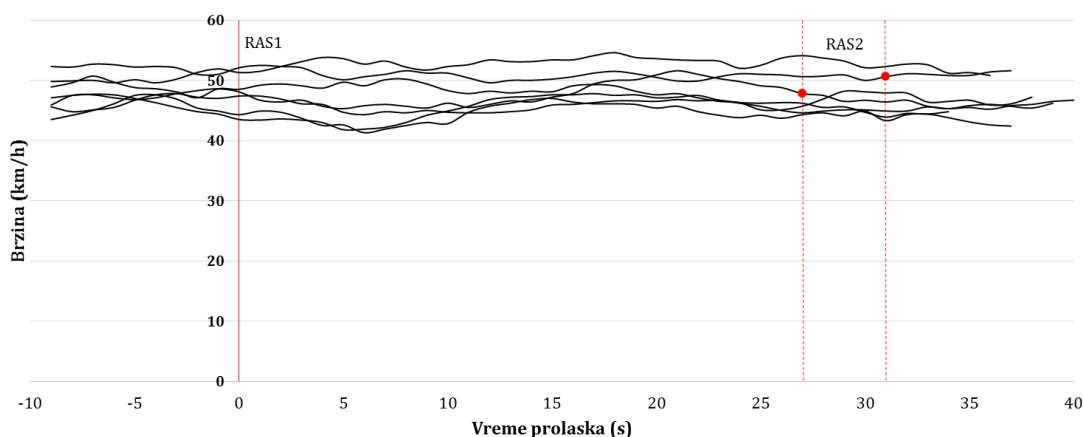
Ukoliko se na osnovu podatka o vremenu prolaska deonicom proračunava prosečna prostorna brzina kretanja vozila, dobijaju se sledeći rezultati (Tabela 63).

Tabela 63 Prosečna brzina kretanja vozila (uticaj KKI)

Redni broj prolaska	Trajanje vremena prolaska (s)	Prosečna prostorna brzina (km/h)
1	28	48.9
2	29	47.2
3	31	44.1
4	27	50.7
5	31	44.1
6	31	44.1
7	30	45.6
Prosek	29.6	46.4

Kod proračuna brzine na ovaj način dobijena prosečna vrednost brzine je nešto niža u odnosu na vrednosti brzine zabeležene GPS uređajem. Razlike se kreću u opsegu od 0.4 do 2.1 km/h.

Rezultati prolaska vozila slobodnom brzinom pod uticajem KKII prikazani su na grafiku 26.



Grafik 26 Brzina slobodnog toka pod uticajem KKII

Kao i u prethodnom slučaju, analizirane su vrednosti brzina vozila koje su zabeležene na početnoj i krajnjoj tački predmetne deonice. Dobijene vrednosti prosečnih brzina su veoma bliske i iznose 46.3 km/h 46.6 km/h, što ide u prilog relativno ravnomernom prolasku vozila duž analizirane deonice (Tabela 64).

Tabela 64 Vremenska brzina kretanja vozila na RAS1 i RAS2 (uticaj KKII)

Redni broj prolaska	Brzina RAS1 (km/h)			Brzina RAS2 (km/h)			Vreme prolaska (s)
1	46.5	Prosečna vrednost	46.3	48.2	Prosečna vrednost	46.6	31
2	48			46.7			29
3	44.8	Mediana	46.3	44.3	Mediana	46.9	33
4	46	Standardno odstupanje	1.4	46.8	Standardno odstupanje	1.5	29
5	44.4			48.6			30
6	48.4			46.9			29
7	47.2			46.9			29
8	45.1			44.3			31

Ukoliko se analizira broj ciklusa usporenja i ubrzanja za svaki od prolazaka primećuje se da su oni ravnomerno raspoređeni i da razlike u zabeleženim vrednostima ubrzanja i usporenja nisu velike (Tabela 65).

Tabela 65 Dinamika promene brzine (V_0 pod uticajem KKII)

Redni broj prolaska	Broj procesa ubrzanja	Opseg ubrzanja (m/s^2)	Broj procesa usporenja	Opseg usporenja (m/s^2)
1	9	0.06-0.61	8	0.03-0.44
2	7	0.06-0.43	8	0.05-0.67
3	8	0.08-0.33	8	0.13-0.36
4	7	0.1-0.33	7	0.03-0.28
5	5	0.07-0.36	5	0.06-0.18
6	6	0.02-0.39	6	0.16-0.44
7	5	0.05-0.3	6	0.014-0.16
8	8	0.04-0.28	8	0.03-0.31

Vrednosti ubrzanja se kreću u opsegu od 0.02 do 0.61 m/s^2 , dok se vrednosti usporenja kreću u opsegu od 0.03 do 0.67 m/s^2 . Zabeležene prosečne vrednosti brzina na nivou svakog prolaska prikazane su u tabeli 66. Prosečna vrednost brzine slobodnog toka na nivou čitavog uzorka iznosi 46.7 km/h.

Tabela 66 Prosečna vrednost brzine slobodnog toka (uticaj KKII)

Redni broj prolaska	Prosečna vrednost brzine (km/h)	Standardno odstupanje
1	46.6	0.89
2	47.6	1.04
3	43.8	0.79
4	47.9	0.99
5	47.4	0.92
6	47.6	1.48
7	47.4	1.06
8	45.3	0.99
Prosek	46.7	1.02

Poređenjem vrednosti realne brzine kretanja zabeležene GPS uređajem i vrednosti prosečne prostorne brzine, proračunate na osnovu vremena prolaska deonicom, odstupanja se kreću u opsegu od 0.2 do 2.5 km/h, u korist brzina zabeleženih GPS uređajem (Tabela 67).

Tabela 67 Prosečna brzina kretanja vozila (uticaj KKII)

Redni broj prolaska	Trajanje vremena prolaska (s)	Prosečna prostorna brzina (km/h)
1	31	44.1
2	29	47.2
3	33	41.5
4	29	47.2
5	30	45.6
6	29	47.2
7	29	47.2
8	31	44.1
Prosek	30.13	45.5

U predstavljanju metodologije saobraćajnih istraživanja, navedeno je da su u cilju unapređenja kvaliteta podataka o slobodnoj brzini kretanja vozila, radarom za snimanje brzine realizovana merenja pod uticajem analiziranih kategorija kiše. Za razliku od snimanja koje je realizovano za suvo vreme, u ovom slučaju je uzorak zabeleženih brzina usled specifičnosti istraživanja bio nešto manji. Pod uticajem KKI snimljene su brzine za 48 vozila, dok su pod uticajem KKII snimljene brzine 30 vozila. Rezultati su prikazani u tabeli 68.

Tabela 68 Karakteristike brzina vozila zabeleženih radarom (uticaj KKI i KKII)

Broj snimljenih vozila	Klasa snimljene brzine (km/h)	Broj snimljenih vozila u okviru klase	Na nivou čitavog uzorka	
			Prosečna vrednost (km/h)	
UTICAJ KKI	40-45	4	Prosečna vrednost (km/h)	48.2
	45-50	34	Mediana (km/h)	48.3
	50-55	9	Standardno odstupanje	2.06
	55-60	1	Opseg snimljenih brzina (km/h)	43.83 - 52.31
Broj snimljenih vozila	Klasa snimljene brzine (km/h)	Broj snimljenih vozila u okviru klase	Na nivou čitavog uzorka	
			Prosečna vrednost (km/h)	
UTICAJ KKII	40-45	1	Prosečna vrednost (km/h)	47.3
	45-50	28	Mediana (km/h)	47.6
	50-55	1	Standardno odstupanje	1.4
	55-60	0	Opseg snimljenih brzina (km/h)	44 - 50.4

Po preporukama iz priručnika HCMA iz 2010. godine, za ovakav način procene brzine slobodnog toka potrebno je da uzorak snimljenih brzina bude preko 100 vozila. Iako taj kriterijum u ovom slučaju nije ispoštovan, procenjene vrednosti slobodne brzine ne odstupaju u značajnoj meri od brzina utvrđenih GPS uređajem, odnosno, na osnovu rezultata snimljenih brzina pod uticajem KKI vrednost slobodne brzine iznosi 48.1 km/h, dok pod uticajem KKII iznosi 47.3 km/h. U slučaju proračuna slobodne brzine pod uticajem KKI dobijena vrednost

standardnog odstupanja je mala, pa je i dobijena vrednost slobodne brzine veoma slična prosečnoj vrednosti brzine ukupnog uzorka.

5.3 SINTEZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Istraživanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže realizovano je pod uticajem četiri kategorije vremenskih prilika. Dve kategorije su se odnosile na kišu različitog intenziteta (KKI i KKII), dok se jedna kategorija odnosila na snežne padavine uz prisustvo bljuzgavice na kolovozu (SSB). Četvrta kategorija istraživanja podrazumevala je idealne vremenske prilike (IVP). Primenjena metodologija kategorizacije kiše je, pored intenziteta kiše, u obzir uzela i zastupljenost kiše određenog intenziteta u okviru formirane baze podataka o vremenskim prilikama.

Istraživanje osetljivosti kapaciteta ulične mreže pod uticajem analiziranih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika realizovano je kroz analizu promene vrednosti zasićenog saobraćajnog toka. Kako bi se omogućila što jednostavnija i kvalitetnija kvantifikacija izolovanog uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na vrednost zasićenog saobraćajnog toka, svi ostali potencijalni uticaji na vrednost zasićenog saobraćajnog toka su minimizirani. U cilju što preciznije ocene uticaja analiziranih kategorija vremenskih prilika na vrednost zasićenog saobraćajnog toka razvijena je posebna metodologija utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka.

Na osnovu rezultata istraživanja definisani su koeficijenti osetljivosti kapaciteta u odnosu na uticaje analiziranih kategorija vremenskih prilika α_1 (pod uticajem KKI), α_2 (pod uticajem KKII) i α_3 (pod uticajem SSB). Vrednost koeficijenta α_1 se kreće od 0.978 do 0.942, vrednost koeficijenta α_2 se kreće od 0.923 do 0.881, a vrednost koeficijenta α_3 od 0.72 do 0.63 (Tabela 69). Dobijenim koeficijentima se u proceduri proračuna kapaciteta saobraćajne trake umanjuje vrednost zasićenog saobraćajnog toka proračunatog za idealne vremenske prilike.

Tabela 69 Koeficijenti osetljivosti kapaciteta

Kategorija nepovoljnih vremenskih prilika	Koeficijent osetljivosti kapaciteta
α_1 (KKI)	0.97 - 0.94
α_2 (KKII)	0.92 - 0.88
α_3 (SSB)	0.72 - 0.63

Identifikovana je značajna osetljivost kapaciteta ulične mreže na uticaj analiziranih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika. Takođe je pokazano da intenzitet uticaja zavisi od intenziteta analiziranih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika i da se uticaj može kvantifikovati.

Pored uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet, realizovano je i istraživanje uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na brzinu kretanja vozila. Osetljivost promene brzine kretanja je analizirana isključivo od uticaja definisanih kategorija kiše. Analiza je podrazumevala praćenje nekoliko različitih kategorija brzina vozila: brzinu vozila koja u nizu (plotunu) prolaze deonicu, brzinu prvog vozila u redu, i brzinu slobodnog toka.

U slučaju analize vremena prolazaka vozila u nizu koje je beleženo video kamerama, razlike u vremenu prolaska pod uticajem analiziranih kategorija kiše u odnosu na vreme prolaska pod uticajem IVP kreću se od 5.2 do 5.3%. U rezultatima koji su dobijeni na ovakav način, dinamika kretanja vozila tokom prolaska deonicom nije poznata, što je onemogućavalo detaljniju analizu. Međutim, na osnovu dobijenih rezultata može se izvući nekoliko značajnih zaključaka:

- postojanost kiše u odnosu na suvo vreme prouzrokovala je značajniju promenu prosečnog vremena prolaska u odnosu na promene pod uticajem različitih intenzita kiše. Porast vremena prolaska deonicom u odnosu na povećanje intenziteta kiše nema linearan trend.
- povećanje intervala sleđenja u odnosu na povećanje intenziteta kiše može se opisati linearnom regresijom.

Snimanjem brzine kretanja vozila u nizu, uz pomoć GPS prijemnika, dobijeno je da prosečna brzina kretanja na analiziranom segmentu deonice u idealnim vremenskim uslovima iznosi 49.1 km/h, dok se pod uticajem KKI i KKII smanjuje na 46.7 km/h (redukcija za 4.9 %) i 44.2 km/h (redukcija za 10 %), respektivno.

S obzirom da je iz prethodne analize izuzeto prvo vozilo, za prosečno vreme prolaska prvog vozila deonicom urađena je posebna analiza, koja je realizovana pod pretpostavkom da prvo vozilo u redu u većini slučajeva neometano prolazi deonicom. Kao i u slučaju vozila u nizu, značajnija razlika je ostvarena između izmerenih vremena prolazaka pod uticajem IVP i KKI (5.7%), nego što je to bio slučaj između uticaja KKI i KKII (oko 1%).

Kod merenja brzine slobodnog toka, jednostavnije je bilo kvantifikovati uticaj definisanih kategorija kiše na promenu brzine vozila. U istraživanju je korišćen GPS uređaj i radar za snimanje brzine. Za posmatranu deonicu, izmerena prosečna slobodna brzina kretanja vozila u idealnim vremenskim uslovima iznosila je 53.5 km/h. Pod uticajem KKI zabeležen je pad na 47.7 km/h (redukcija 10.7%), dok je pod uticajem KKII zabeležen pad slobodne brzine na 46.7 km/h (redukcija 12.8%). Vrednosti brzine slobodnog toka, koje su proračunate na osnovu podataka dobijenih sa radara za snimanje brzine, su nešto veće. Proračunata vrednost slobodne brzine u IVP iznosi 54.1 km/h, dok pod uticajem KKI i KKII iznosi 48.2, odnosno 47.3 km/h.

Sveobuhvatan prikaz dobijenih rezultata redukcije brzine pod uticajem analiziranih kategorija kiše prikazan je u tabeli 70.

Tabela 70 Redukcija brzine pod uticajem analiziranih kategorija kiše

Redukcija brzine vozila pod uticajem analiziranih kategorija kiše (%)			
	Brzina vozila u nizu	Brzina prvog vozila	Brzina slobodnog toka
KKI	4.9	5.7	10.7
KKII	10	1	12.8

Na osnovu analiziranog uticaja definisanih kategorija kiše na brzinu kretanja vozila, opšti zaključak je, da kiša utiče na promenu brzine kretanja. Stiče se utisak da bi ovakav zaključak mogao da se donese i bez realizacije ikakvih istraživanja, međutim, ono što bi u tom slučaju bilo nepoznato je kvantifikacija tih promena. Analizirajući dobijene rezultate, može se zaključiti i da prisustvo kiše prouzrokuje značajnije efekte na smanjenje brzine, u odnosu na razlike u analiziranim intenzitetima kiše.

Poredeći rezultate uticaja promene brzine slobodnog toka i brzine vozila u nizu pod uticajem definisanih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika, može se primetiti da su u slučaju kretanja vozila u nizu zabeležene manje vrednosti brzine. Ovo je očekivano, s obzirom na prisustvo međusobne interakcije vozila u nizu koja takođe ima uticaja na brzinu kretanja vozila. Međutim, ukoliko se posmatraju i intenziteti smanjenja snimljenih brzina, pod analiziranim uticajima kiše, razlike postoje. Pokazalo se da je intenzitet uticaja kiše na brzinu slobodnog toka intenzivniji od uticaja na brzinu kretanja vozila koje se kreće u interakciji sa ostalim vozilima. Obrazloženje ovako dobijenih rezultata može se naći u postojanju međusobne interakcije između vozila, kao dodatnog faktora uticaja na brzinu kretanja vozila.

Detaljnija analiza uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, u odnosu na nivo međusobne interakcije između vozila, biće realizovana u narednom poglavlju. Nivo interakcije između vozila će se u konkretnom slučaju posmatrati kroz stepen iskorišćenja kapaciteta deonice.

6. MODIFIKACIJA FUNKCIJA VREMENA PUTOVANJA (FVP) U ODNOSU NA UTICAJ NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA

6.1 POSTAVKA PROBLEMA

U prethodnom delu disertacije, istaknut je značaj funkcija vremena putovanja (FVP) u modeliranju saobraćajnog opterećenja. Pored toga, predstavljene su najčešće korišćene FVP uz obrazloženje osnovnih prednosti i nedostataka (Prilog II).

Ukoliko se u modeliranju raspodele saobraćajnog opterećenja kao osnovni kriterijum za izbor trase posmatra vreme putovanja, FVP predstavljaju jedan od najvažnijih ulaznih parametara modeliranja. Bez obzira o kom tipu FVP da je reč, dva osnovna elementa koja figurišu u svakoj od predstavljenih funkcija su brzina slobodnog toka, odnosno vreme putovanja pri brzini slobodnog toka i kapacitet. U zavisnosti od forme funkcije u pojedinim izvornim oblicima FVP figuriše slobodna brzina, dok je u pojedinim zastupljeno vreme putovanja pri slobodnoj brzini. U svakom slučaju, osnovna zakonitost koja se opisuje ovim funkcijama je promena vremena putovanja (odnosno brzine) u zavisnosti od promene odnosa protoka saobraćaja i kapaciteta, odnosno koeficijenta iskorišćenja kapaciteta (q/c). Kod svake od ovih funkcija, logika je ista. Sa porastom vrednosti koeficijenta iskorišćenja raste i vreme putovanja. Osnovnu razliku kod različitih tipova FVP predstavlja trend, odnosno uspostavljena zakonitost povećanja vremena putovanja u odnosu na porast vrednosti koeficijenta iskorišćenja kapaciteta. Uniformni obrazac ne postoji i praktično je preporuka, da se za područje za koje se formira model, realizuje istraživanje koje bi pokazalo koji tip FVP na najbolji način opisuje rezultate snimljene na terenu.

U zavisnosti od karakteristika saobraćajne mreže, odnosno posmatrane kategorije saobraćajnica, moguće je da određeni tip funkcije nešto kvalitetnije opisuje rezultate merenja u odnosu na ostale. To ujedno predstavlja i osnovni kriterijum izbora.

Razlika između funkcija vremena putovanja postoji i kada je u pitanju nivo detaljnosti parametara koji se uzimaju u obzir u proračunu vremena putovanja u odnosu na koeficijent iskorišćenja kapaciteta. U zavisnosti od zahtevanog nivoa detaljnosti modeliranja saobraćaja FVP mogu uzimati u obzir proračun vremenskih gubitaka na svakoj pojedinačnoj raskrsnici. Međutim, sa porastom nivoa prostorne obuhvatnosti područja za koje se modelira opterećenje ulične mreže opadaju mogućnosti za visokim nivoom detaljnosti FVP. Kada su već pomenuti vremenski gubici na raskrsnici važno je istaći da oni prevashodno zavise od intenziteta saobraćajnog toka i načina upravljanja. Pitanje koje se donekle nametnulo i u jednom od prethodnih poglavlja disertacije je u kojoj meri je za prognozu transportnih zahteva moguće predvideti buduće signalne planove i kao takve ih uvrstiti u model. Stim u vezi, kada je reč o modeliranju i prognozi transportnih potreba za duži vremenski horizont, FVP uglavnom sadrže parametre koji na makro nivou mogu dovoljno dobro da opišu zakonitost promene vremena putovanja u odnosu na koeficijent iskorišćenja kapaciteta.

U prethodnom delu istraživanja, nezavisno je utvrđen uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet i na brzinu, odnosno vreme putovanja. Kako je pomenuto, ova dva parametra predstavljaju najvažnije elemente ponude transportnog sistema koji se uzimaju u obzir u proceduri modeliranja opterećenja ulične mreže. U ovom poglavlju će prethodno dobijeni rezultati i zaključci biti inegrirani kroz implementaciju u FVP. Svrha kalibrisanja FVP na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika jeste da se kroz modeliranje testira ulična mreža i ukaže na potencijalno kritične promene u koeficijentu iskorišćenja kapaciteta ulične mreže.

Implementacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u FVP bazirana je na rezultatima istraživanja na prethodno analiziranoj deonici. Analizirana deonica sadrži dve karakteristične raskrsnice (RAS1 i RAS2). Na RAS1 koja predstavlja početnu tačku deonice analiza faktora progresije saobraćajnog toka pokazuje da se oko 97.9% saobraćajnih zahteva se na raskrsnici ispostavlja tokom crvenog signalnog pojma. Tokom perioda istraživanja, signalni plan na RAS1 je okarakterisan ciklusom od 90 sekundi, sa trajanjem zelenog signalnog pojma na analiziranom prilazu raskrsnici od 36 sekundi ($g/C=0.4$). Ni u jednom slučaju

tokom perioda istraživanja na RAS1 nije identifikovano postojanje inicijalnog reda, bez obzira na vremenske prilike, što je direktno ukazivalo na to da na analiziranoj raskrsnici ne postoji problem sa kapacitetom. Na RAS2, tokom perioda analize, zabeleženo je mnogo značajnije učešće zelenog signalnog pojma u odnosu na crveni signalni pojam, kao posledica retko ispostavljenih zahteva pešaka.

Na osnovu situacije na terenu, postojala je dilema da li u vreme prolaska deonicom za potrebe ove analize uključiti i vremenske gubitke na RAS1. Istraživanjima vremenskih gubitaka na raskrsnici koja su realizovana tokom 2013. godine utvrđeno je da analitički model vremenskih gubitaka iz priručnika HCM iz 2000. godine na veoma dobar način aproksimira empirijski dobijene podatke o vremenskim gubicima na raskrsnici (Čelar 2013.). Struktura pomenutog modela, prosečne vremenske gubitke na raskrsnici posmatra kao zbir tri komponente koje čine: prosečni uniformni vremenski gubici, prosečni dodatni vremenski gubici i prosečni inicijalni vremenski gubici. Prosečni dodatni vremenski gubici obuhvataju slučajne gubitke i gubitke usled prezasićenja dok prosečni inicijalni vremenski gubici podrazumevaju postojanje inicijalnog reda na početku perioda analize. Na osnovu prirode nailaska toka vozila na analiziranoj raskrsnici ove dve komponente vremenskih gubitaka ne bi imale velikog značaja. Stabilna realizacija saobraćajnog procesa i nailazak vozila na raskrsnicu tokom crvenog signalnog pojma bez pojma inicijalnog reda, kao najznačajnije, preporučuje uzimanje u obzir komponente prosečnih uniformnih vremenskih gubitaka. Forma proračuna prosečnih uniformnih vremenskih gubitaka je takva da oni prevashodno zavise od načina upravljanja i stepena zasićenja:

$$d_1 = \frac{0,5C(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - \left[\min(1, x) \frac{g}{C} \right]}$$

d_1 – uniformni vremenski gubici

C – dužina sıklusa

g – trajanje zelenog signalnog pojma

x – stepen zasićenja (koeficijent iskorišćenja kapaciteta)

Posmatrajući navedeni izraz, jedinu promenljivu u konkretnom slučaju predstavlja stepen zasićenja. Ukoliko se uzme u obzir da su poznate vrednosti uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet raskrsnice, stiče se utisak da bi se uzimanjem u obzir vremenskih gubitaka na raskrsnici više dalo na značaju uticaju intenziteta saobraćajnog opterećenja na vreme putovanja, nego uticaju nepovoljnih vremenskih prilika, što predstavlja prioritet u disertaciji. Ova pretpostavka je, između ostalog, uticala na izbor tipa FVP na kojem će biti primenjena metodologija prilagođavanja uticaju nepovoljnih vremenskih prilika.

U okviru analiziranih vremenskih prilika izvršeno je beleženje promena u vremenima prolaska kroz deonicu za različite vrednosti koeficijenta iskorišćenja kapaciteta, odnosno odnosa q/c . Podaci o prosečnim vremenima prolazaka deonicom mereni su na nivou jednog ciklusa. Takođe je i protok saobraćaja sniman na nivou jednog ciklusa pa kao takav ekspaniran na nivo od jednog časa. Na osnovu tih podataka bilo je moguće generisati tačke u koordinatnom sistemu u kojem je na x-osi vrednost koeficijenta iskorišćenja kapaciteta a na y-osi vreme prolaska deonicom. Svaka od tačaka u koordinatnom sistemu je generisana kao prosečna vrednost od 4 do 6 snimljenih ciklusa sa sličnim karakteristikama (isti broj vozila po ciklusu, pod identičnim vremenskih prilikama).

U ovakvoj postavci problema, vremena prolaska deonicom su beležena između zaustavnih linija na RAS1 i na RAS2. Imajuću u vidu karakteristike RAS2 zabeležen je mali procenat zaustavljanja vozila na RAS2 usled retkih slučajeva ispostavljanja zahteva za realizacijom prelazaka kolovoza od strane pešaka (manje od 1%).

U okviru ovog poglavlja neće biti reči o proceduri izbora FVP koja najbolje opisuje vreme putovanja na uličnoj mreži. Na ovu temu realizovan je veliki broj istraživanja kroz koja su dati predlozi kalibracije postojećih, kao i kreiranje apsolutno novih FVP. Fokus je isključivo stavljen na promene koje u FVP izaziva uticaj nepovoljnih vremenskih prilika.

Na osnovu toga, nejjednostavnije je bilo odabrati jedan od postojećih tipova FVP na kojem bi pomenuti uticaj mogao da se istraži. Karakteristike istraživane deonice i

osnovna svrha istraživanja preporučili su primenu BPR funkcije vremena putovanja. I pored nedostataka ove FVP koji su detaljnije obrazloženi u Prilogu II, BPR funkcija je predstavljala najbolji izbor iz nekoliko razloga:

- *Jednostavnost funkcije.* Jednostavnost funkcije, koja se ogleda u malom broju promenljivih koje u njoj figurišu, omogućava lakšu estimaciju analiziranog uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, što i jeste jedan od prioriteta disertacije.
- *Metodologija istraživanja.* Karakteristike deonice i izostavljanje uticaja vremenskih gubitaka na raskrsnici omogućili su primenu ove FVP.

Još jednu povoljnost vezanu za izbor BPR funkcije predstavlja i to što je u Transportnom modelu Beograda iz 2015. godine primenjen ovaj tip FVP. Transportni model Beograda će biti iskorišćen i u svrhu testiranja implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u procedure modeliranja opterećenja ulične mreže.

Podaci iz istraživanja iskorišćeni su da se definiše BPR funkcija za analiziranu deonicu. Iako nije praksa da se FVP definišu za jednu deonicu, već se obično tretira trasa od nekoliko deonica, imajući u vidu svrhu istraživanja napravljen je izuzetak. Ukoliko bi se ovakva vrsta istraživanja realizovala na dužoj trasi sa više raskrsnica, pretpostavka je da bi se i u tom slučaju identifikovale određene promene u karakteristikama saobraćajnog toka prouzrokovane nepovoljnim vremenskim prilikama. Međutim, postojao bi i veliki broj dodatnih uticaja koji bi morali da se kvantifikuju (uticaj signalnih planova na vremenske gubitke na svakoj raskrsnici, ulivanje i izlivanje sa deonice, manevri parkiranja, struktura saobraćajnog toka i slično). Uzimanje u obzir i kvantifikacija svih potencijalnih uticaja na promene u karakteristikama saobraćajnog toka verovatno bi dalo realnije rezultate, ali materijalni i organizacioni resursi neophodni za istraživanje takve vrste su u konkretnom slučaju to onemogućili.

6.2 DEFINISANJE OBLIKA FUNKCIJE VREMENA PUTOVANJA

U cilju pojašnjenja primenjene metodologije kalibrisanja BPR funkcije prema uticaju nepovoljnih vremenskih prilika, još jednom će biti predstavljen osnovni oblik funkcije:

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{q}{c} \right)^\beta \right)$$

t – vreme putovanja

t_0 – vreme putovanja pri brzini slobodnog toka

q – protok saobraćaja

c – kapacitet deonice

Analizirajući podatke dobijene istraživanjima, ispostavlja se da je vrednost t_0 (odnosno v_0) utvrđena za definisane tipove vremenskih prilika. Kapacitet deonice je određen kapacitetom RAS1 gde su vrednosti kapaciteta RAS1 takođe definisane za sve analizirane tipove vremenskih prilika. Na osnovu podataka dobijenih sa terena zabeležena su vremena prolazaka deonicom za odgovarajuće odnose q/c . Na osnovu navedenog se ispostavlja da za potpuno definisanje BPR funkcije nedostaju jedino vrednosti koeficijenata α i β . Za utvrđivanje vrednosti neophodnih koeficijenata primenjena je aproksimacija (fitovanje) ekperimentalno utvrđenih podataka (EUP) o vremenu prolaska deonicom za određeni odnos q/c .

Imajući u vidu da su vrednosti pojedinih parametara u funkciji poznate, transformacijom funkcije dolazi se sledećeg oblika:

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{q}{c} \right)^\beta \right)$$
$$\frac{t - t_0}{t_0} = \alpha \left(\frac{q}{c} \right)^\beta$$

Ako se poznati parametri predstave na sledeći način

$$\frac{t - t_0}{t_0} = y \quad \frac{q}{c} = x$$

Konačan pojednostavljeni oblik funkcije bi glasio:

$$y = \alpha x^\beta$$

Pošto je reč o stepenom obliku funkcije, aproksimacija podrazumeva linearizaciju odnosno svodenje funkcije na sledeći oblik:

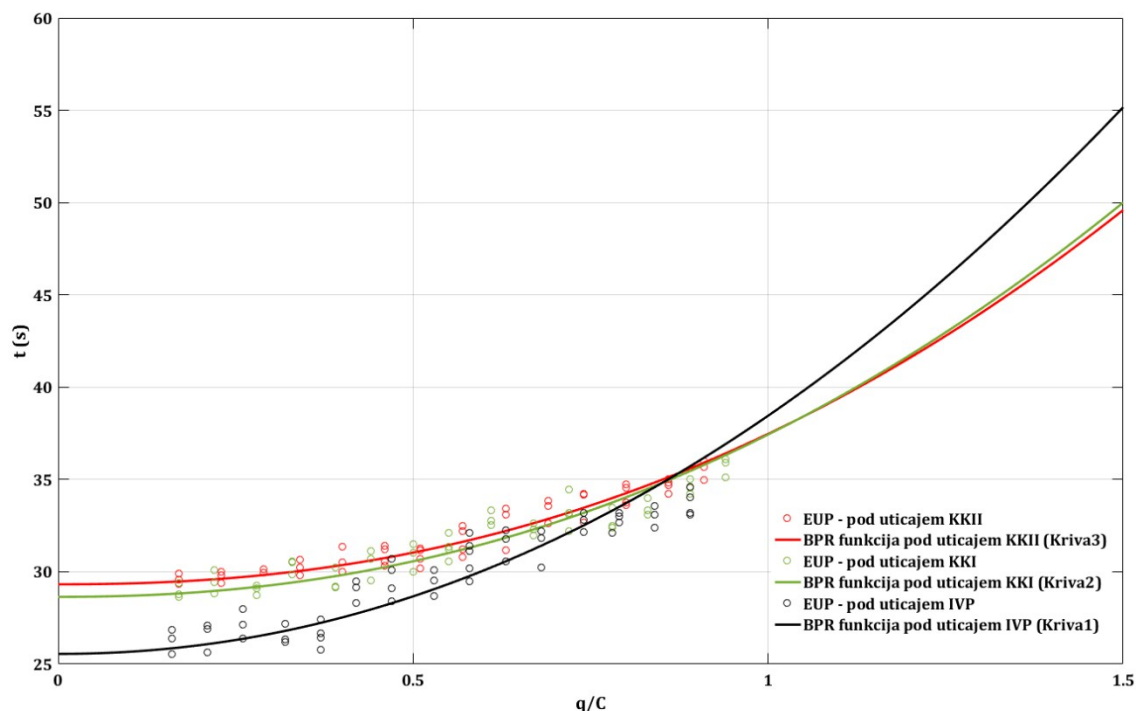
$$\log(y) = \beta \log(x) + \log(\alpha)$$

Aproksimacijom ove funkcije u odnosu na ekperimenatno formiranu bazu podataka, generisane su odgovarajuće vrednosti koeficijenata α i β . Za kriterijum optimizacije izabrana je metoda minimizacije najmanjih kvadrata odstupanja, a programski kod je napisan u softveru MatLabR2016a (Prilog V). Na osnovu prethodnih istraživanja, kao kriterijum za generisanje vrednosti koeficijenata α i β postavljeno je da opseg pretrage optimalnih vrednosti koeficijenata bude:

$$0.01 < \alpha < 5 \quad \text{sa korakom od } 0.001$$

$$0.01 < \beta < 8 \quad \text{sa korakom od } 0.001$$

Uzimajući u obzir opseg vrednosti odnosa q/c do kojeg su analizirane funkcije vremena putovanja u prethodnim istraživanjima (na primer, u radu Akčelika iz 1991. godine FVP ispitivana do $q/c < 1.2$) za graničnu vrednost je postavljena $q/c = 1.5$. Aproksimacijom krivih na osnovu EUP, generisane su BPR funkcije za različite kategorije vremenskih prilika (Grafik 27).



Grafik 27 Aproximirane BPR krive na osnovu ekperimentalno utvrđenih podataka

Za svaku od formiranih kriva iskorišćene su prethodno dobijene vrednosti o vremenu prolaska deonicom pri brzini slobodnog toka (t_0) pod uticajem analiziranih vremenskih prilika. U obzir su uzete i promene u vrednosti kapaciteta analizirane deonice pod uticajem analiziranih vremenskih prilika. Dobijeni koeficijenti α i β za svaku od aproksimiranih kriva predstavljeni su u tabeli 71.

Tabela 71 Generisani koeficijenti BPR krivih

	t_0 (s)	c (voz/h)	α	β
BPR – uticaj IVP (Kriva1)	25.55	761	0.505	2.049
BPR – uticaj KKI (Kriva2)	28.64	721	0.307	2.189
BPR – uticaj KKII (Kriva3)	29.32	701	0.278	2.247

Sa grafika se vidi da se aproksimirane krive međusobno seku. Uspostavljanjem sledećih jednakosti,

$$25.55 + 12.9(x)^{2.094} = 28.64 + 8.79(x)^{2.189}$$

$$25.55 + 12.9(x)^{2.094} = 29.32 + 8.15(x)^{2.247}$$

$$29.32 + 8.15(x)^{2.247} = 28.64 + 8.79(x)^{2.189}$$

dobija se da je tačka preseka Krive1 i Krive2 u $q/C=0.85$, tačka preseka Krive1 i Krive3 u $q/C=0.88$ dok je tačka preseka Krive2 i Krive3 u $q/C=1.04$.

Posmatrajući EUP sa grafika 27 stiže se utisak da se sa porastom odnosa q/c disperzija vrednosti vremena putovanja smanjuje. Ovo se može povezati sa pretpostavkom da intenzitet uticaja nepovoljnih vremenskih prilika opada sa porastom odnosa q/c . Utemeljenje u ovakvoj pretpostavki može se naći i u prethodno dobijenim vrednostima odstupanja brzine slobodnog toka i brzine plotuna vozila pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika. Sa porastom odnosa q/c brzina kretanja vozila opada i u idealnim vremenskim prilikama. Uticaj međusobne interakcije između vozila raste i postaje preovlađujući u odnosu na ostale potencijalne uticaje na karakteristike saobraćajnog toka. Kao hipotetički primer može da se uzme deonica na kojoj u određenom delu vršnog perioda stepen zasićenja (q/c) dostiže vrednosti $q/c > 1$. Na osnovu dobijenih rezultata može se pretpostaviti da bi nepovoljne vremenske prilike znatno manje uticale na promenu brzine kretanja, koja je već prilično umanjena u odnosu na brzinu slobodnog toka ili u odnosu na eksploatacionu brzinu kretanja tom deonicom. Moguće je da bi nepovoljne vremenske prilike povećale verovatnoću određenih događaja koji bi indirektno mogli da utiču na smanjenje brzine kretanja, kao na primer, saobraćajna nezgoda ili problem sa motornim vozilom. Međutim, izolovano posmatrajući intenzitet uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, mogla bi se potvrditi prethodna konstatacija.

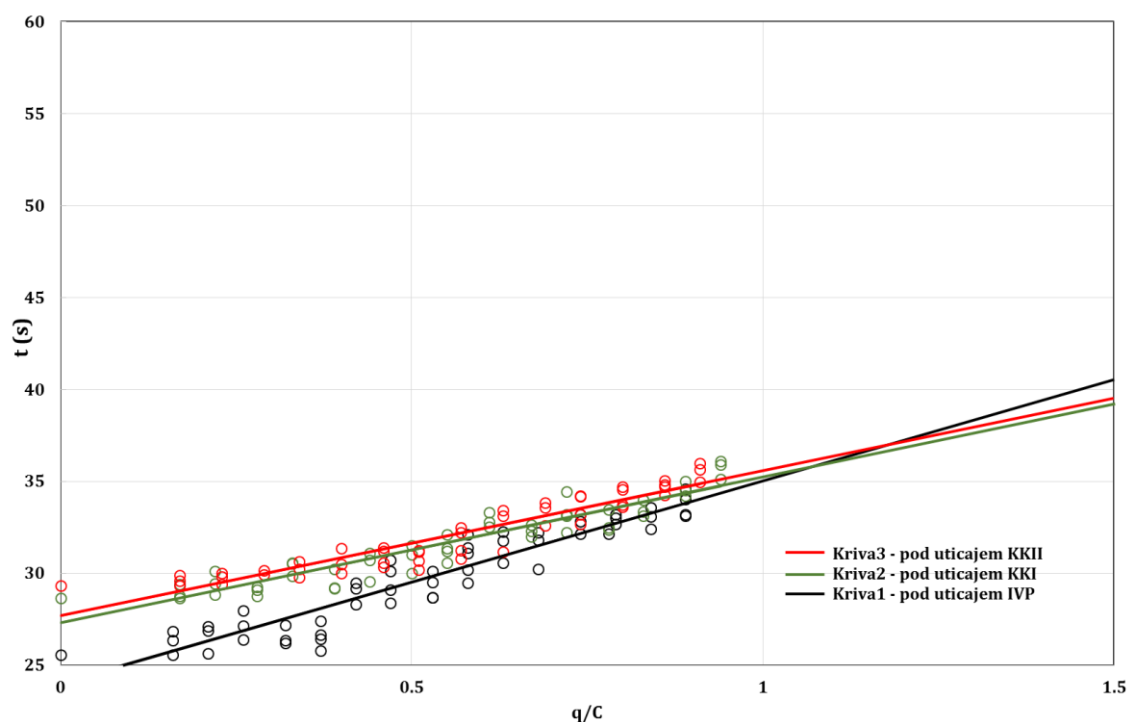
Pored toga što rezultati aproksimiranih BPR funkcija pokazuju da se disperzija zabeleženih vremena prolazaka deonicom smanjuje sa povećanjem odnosa q/c , u cilju dodatne potvrde za svaku kategoriju EUP testirana je linearna regresija (Tabela 72).

Tabela 72 Jednačine linearne regresije na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka

	Oblik funkcije	R^2
Kriva1	$y = 10.98x + 24.04$	0.89
Kriva2	$y = 7.91x + 27.29$	0.88
Kriva3	$y = 7.85x + 27.7$	0.87

Iz tabele 72 se vidi da linearnu regresiju u svakom od tri slučaja karakterišu visoke vrednosti koeficijenta determinacije. Visok koeficijent determinacije kod linearne regresije može se obrazložiti nepostojanjem EUP za vrednosti $q/c > 0.94$. Iako se sa grafika 28 može sa velikom verovatnoćom tvrditi da će se Kriva1 u određenim

tačkama preseći sa Krivom2 i Krivom3, i za sve ostale kombinacije pokazano je da postoje tačke preseka koje govore u prilog prethodne tvrdnje. Presečna tačka za Krivu1 i Krivu2 je u $q/c = 1.05$, za Krivu1 i Krivu3 je u $q/c = 1.17$, dok je za Krivu2 i Krivu3 u tačka preseka nešto dalje, u $q/c = 6.83$. Sporija konvergencija Krive2 i Krive3 može se objasniti veoma bliskim EUP za $q/c \neq 0$.



Grafik 28 Prave linearne regresije na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka

Definitivno se može zaključiti da, imajući u vidu rezultate linearne regresije, krive sa porastom odnosa q/C međusobno konvergiraju, odnosno seku se. Na osnovu tačaka preseka vidi se da brzina konvergencije nije ista u sva tri slučaja, odnosno najsporija konvergencija je zabeležana kada su u pitanju Kriva2 i Kriva3.

Dobijeni rezultati ukazali su na mogućnost postavljanja dodatne hipoteze. U cilju uopštavanja rezultata istraživanja i opšte primenljivosti zaključaka kada su u pitanju ostali tipovi FVP, dodatna hipoteza glasi:

„Vreme putovanja će pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika da konvergira vrednostima vremena putovanja pod idealnim vremenskim prilikama za kritične vrednosti odnosa q/c .“

Dokazivanjem ove hipoteze u značajnoj meri bi se doprinelo univerzalnosti kalibracije FVP uticaju nepovoljnih vremenskih prilika, bez obzira o kom tipu funkcije je reč. Kao što je već i pomenuto u prethodnom tekstu, cilj istraživanja nije da se utvrdi optimalan tip FVP, već da se definišu opšte zakonitosti uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na FVP bez obzira na tip.

Pošto je kroz istraživanje kapacitet deonice definisan kapacitetom raskrsnice značajno je ustanoviti koje su to kritične vrednosti iskorišćenja kapaciteta na deonici. Prema priručniku HCM iz 2000. godine kritične vrednosti stepena zasićenja na raskrsnici su opisani na sledeći način (Tabela 73)

Tabela 73 Kritične vrednosti stepena zasićenja raskrsnice (HCM 2000)

Kritične vrednosti stepena zasićenja raskrsnice (q/c)	Oцена
<0.85	Raskrsnica funkcioniše ispod kapaciteta. Ne ostvaruju se prekomerni vremenski gubici
0.85 – 0.95	Raskrsnica funkcioniše blizu kapaciteta. Mogu se očekivati veći vremenski gubici ali nema kontinualne pojave inicijalnih redova.
0.95 – 1	Nestabilan saobraćajni tok rezultuje povećanim vremenskim gubicima. U cilju otklanjanja prekomernih gubitaka potrebno je intervenisati.
>1	Transportni zahtevi prevazilaze kapacitet raskrsnice. Očekuju se veliki vremenski gubici i konstantno prisustvo reda na raskrsnici.

Postavljena hipoteza podrazumevala je ispitivanje u kojoj meri dobijene BPR krive sa grafika 27 (Kriva2 i Kriva3), odstupaju od definisanog oblika ukoliko bi se kao uslov postavila konvergencija sa BPR krivom u idealnim vremenskim prilikama u oblasti kritičnih vrednosti odnosa q/C . Ono što je uobičajena pojava u istraživanjima ove vrste je da eksperimentalno dobijeni podaci vremena putovanja veoma retko budu utvrđeni za vrednosti odnosa $q/c > 1$, jer jednostavno ne postoji takva situacija na terenu (bez prisustva zagušenja). U konkretnom istraživanju, maksimalna vrednost odnosa q/c za koji je dobijena vrednost vremena prolaska pojavljuje se u slučaju Krive2 i iznosi 0.94. Za Krivu1, maksimalna vrednost odnosa q/c za koji je dobijeno vreme prolaska iznosi 0.89, dok u slučaju Krive3 ta vrednost iznosi 0.91.

U svrhu ispitivanja odstupanja korigovanih BPR kriva dobijenih pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, ponovo je iskorišćen softver MatLabR2016a. Programski kod je formiran na takav način da prvi korak podrazumeva unošenje

osnovnih karakteristika referentne krive (BPR kriva formirana pod uticajem IVP) (Prilog VI). U drugom koraku se za traženu krivu unosi vrednost brzine slobodnog toka pod uticajem definisane kategorije nepovoljnih vremenskih prilika. Pored brzine slobodnog toka, unose se i vrednosti odnosa kritičnih vrednosti q/c sa referentne krive kako bi se obezbedila konvergencija. U konkretnom kodu je navedeno da tačka konvergencije bude $q/c=1$ i da kriterijum za konvergenciju bude odstupanje od 0.5 km/h.

U cilju analize dobijenih odstupanja ispitivano je nekoliko scenarija konvergencije u odnosu na definisan opseg tačaka kritičnih vrednosti q/c sa referentne krive. Raspon tačaka kritičnih vrednosti odnosa q/c je bio 0.5 (0.85, 0.9, 0.95...). Vrednosti generisanih koeficijenata α i β u odnosu na analizirane scenarije predstavljeni su u tabeli 74.

Tabela 74 Generisani koeficijenti korigovanih BPR krivih

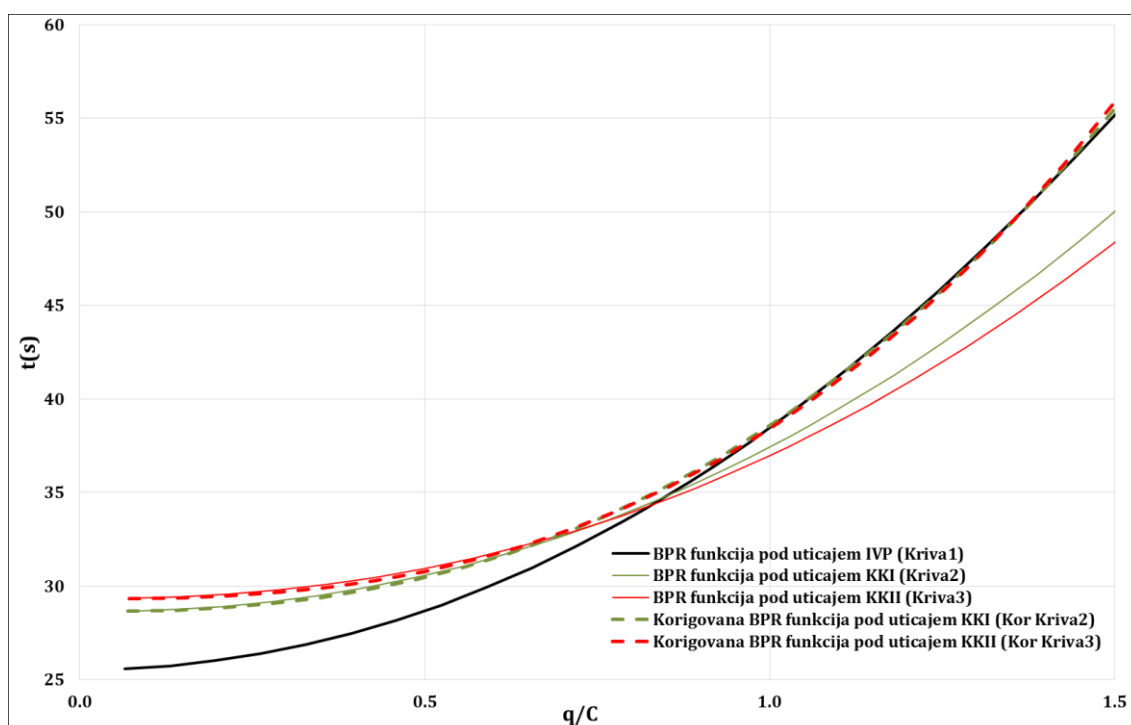
Opseg kritičnih vrednosti sa referentne krive	Korigovana KKI		Korigovana KKII	
	α	β	α	β
0.85 - 1.5	0.338	2.549	0.306	2.694
0.9 - 1.5	0.342	2.503	0.31	2.641
0.95 - 1.5	0.345	2.47	0.314	2.592
1 - 1.5	0.347	2.449	0.317	2.557

Dobijeni rezultati su pokazali da su razlike između korigovanih i inicijalnih kriva, u oblasti odnosa q/c u okviru koje su postojali ekperimentalno utvrđeni podaci o vremenu prolaska, veoma male. Procentualno izražene razlike prikazane su u tabeli 75. Kao što se moglo i pretpostaviti, najbolji rezultati su ostvareni za opseg tačaka konvergencije od 0.85 – 1.5.

Tabela 75 Procentualna odstupanja između korigovanih i inicijalno definisanih krivih

q/C	Odstupanja za korigovanu Krivu2 (pod uticajem KKI) %				q/C	Odstupanja za korigovanu Krivu3 (pod uticajem KKII) %			
	0.85-1.5	0.9-1.5	0.95-1.5	1-1.5		0.85-1.5	0.9-1.5	0.95-1.5	1-1.5
	0.05	0.05	0.04	0.04		0.04	0.04	0.04	0.03
	0.17	0.15	0.13	0.12		0.16	0.14	0.12	0.10
	0.32	0.27	0.24	0.21		0.32	0.28	0.23	0.19
	0.52	0.44	0.37	0.32		0.48	0.40	0.32	0.26
	0.70	0.57	0.47	0.40		0.60	0.48	0.36	0.27
	0.86	0.67	0.53	0.44		0.72	0.55	0.37	0.24
	0.88	0.65	0.48	0.37		0.70	0.48	0.27	0.10
	0.84	0.57	0.37	0.23		0.59	0.32	0.06	-0.14
	0.74	0.41	0.16	0.00		0.33	0.02	-0.28	-0.50
	0.45	0.09	-0.18	-0.36		-0.09	-0.44	-0.78	-1.04
	0.02	-0.36	-0.64	-0.83		-0.70	-1.07	-1.43	-1.70
	-0.58	-0.97	-1.27	-1.46		-1.57	-1.96	-2.34	-2.63
	-0.88	-1.26	-1.54	-1.72	0.91	-2.07	-2.45	-2.84	-3.12
	-1.30	-1.67	-1.96	-2.14		-2.63	-3.01	-3.39	-3.67
0.94	-1.76	-2.13	-2.41	-2.60		-3.18	-3.54	-3.90	-4.17
	-2.28	-2.65	-2.92	-3.10	1	-4.02	-4.38	-4.74	-5.01
1	-2.72	-3.07	-3.34	-3.51					

Na narednom grafiku su prikazane inicijalno definisane i korigovane BPR krive koje prikazuju zavisnost vremena prolaska od odnosa q/c u analiziranim kategorijama nepovoljnih vremenskih prilika (Grafik 29).



Grafik 29 Korigovane i inicijalno definisane BPR krive

Vrednosti inicijalno generisanih koeficijenata α i β za Krivu2 i Krivu3, kao i vrednosti koeficijenata za korigovane krive (Kor Kriva2 i Kor Kriva3) predstavljeni su u tabeli 76.

Tabela 76 Inicijalno definisane i korigovane vrednosti koeficijenata α i β

	α	β
Kriva 2	0.307	2.189
Kor Kriva 2	0.338	2.549
Kriva 3	0.278	2.247
Kor Kriva 3	0.306	2.694

Ovako dobijeni rezultati idu u prilog postavljenoj hipotezi. Može se zaključiti da “prinudnom” konvergencijom korigovanih BPR funkcija (Kor Kriva2 i Kor Kriva3) ka referentnoj BPR funkciji (Kriva1) nisu identifikovana značajna odstupanja u domenu eksperimentalno utvrđenih podataka. Kao dodatak procentualno izraženim vrednostima odstupanja između korigovanih i inicijalno generisanih krivih, testirana su još dva pokazatelja: koren srednje kvadratne greške (RMSE) i srednja apsolutna greška (MAE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - w_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - w_i|$$

RMSE je dobijena kvadratom odstupanja i ona veću težinu daje velikim greškama, dok je MAE linearna veličina, tako da sva odstupanja teorijskih od empirijskih vrednosti imaju istu težinu. U cilju bolje evaluacije odstupanja, ispitana su oba pokazatelja. Kako je rečeno, dobijene vrednosti pokazatelja su prvenstveno iskorišćene u svrhu poređenja razlika u vrednostima između korigovanih (Kor Kriva2 i Kor Kriva3) i inicijalno definisanih (Kriva2 i Kriva3) (Tabela 77). Pokazatelji su testirani na segmentu krivih u okviru koga su postojali eksperimentalno utvrđeni podaci o vremenu prolazaka za određene odnose q/c .

Tabela 77 Razlike u RMSA i MAE između korigovanih i inicijalno definisanih krivih

	RMSA	MAE
Kor Kriva2 i Kriva2	0.16	0.13
Kor Kriva3 i Kriva3	0.11	0.07

Imajući u vidu opsege zabeleženih vremena prolazaka, dobijene razlike su veoma male i ukazuju na visok nivo sličnosti između inicijalno definisanih i korigovanih krivih.

U determinisanju FVP, kompleksan poduhvat predstavlja definisanje FVP u segmentu vrednosti odnosa $q/c > 1$. Definisanje zavisnosti vremena putovanja i koeficijenta iskorišćenja kapaciteta u okviru ove oblasti posebno je značajno kod modeliranja raspodele opterećenje ulične mreže u okviru kog se primenjuju iterativni modeli. U prvim iteracijama raspodele saobraćajnog opterećenja moguće je da se na pojedinim deonicama pojave saobraćajna opterećenja koja su veća od raspoloživih kapaciteta deonice. U tim situacijama kvalitetno definisana FVP treba da omogući dodeljivanje što realnije vrednosti vremena putovanja kako bi se u narednim iteracijama omogućilo uspostavljanje ekvilibrijuma u opterećenju ulične mreže.

U ovako predloženoj metodologiji kalibracije FVP prema nepovoljnim vremenskim prilikama, najbitniji korak predstavlja definisanje referentne krive koja opisuje zavisnost promene vremena putovanja u odnosu na koeficijent iskorišćenja kapaciteta pod uticajem IVP. U tom koraku je potrebno utvrditi koji tip FVP na najbolji način opisuje zavisnosti analiziranih veličina. Nakon toga se na osnovu poznatih podataka o redukciji brzine slobodnog toka i kapaciteta pod uticajem definisanih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika i na osnovu pretpostavki iz postavljene hipoteze može generisati FVP u nepovoljnim vremenskim prilikama.

Iz realizovanog istraživanja je evidentno da će modifikovana FVP, formirana na ovakav način, u određenoj meri da odstupa u odnosu na eksperimentalno utvrđene podatke. Pozitivna stvar je što dobijene razlike nisu velike i omogućavaju da se na sasvim zadovoljavajući način opiše zakonitost vremena putovanja u odnosu na koeficijent iskorišćenja kapaciteta. U konkretnom slučaju vremenski gubici nisu uzeti u obzir, ali bi ista metodologija mogla da se primeni i za tipove FVP koji vremenske gubitke na raskrsnici uzimaju u obzir.

Važno je istaći da pri formiranju FVP pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika primenom ove metodologije treba ispoštovati dva osnovna kriterijuma:

- početna tačka krive treba da bude definisana redukovanim vremenom putovanja pri brzini slobodnog toka (ili redukovanom brzinom slobodnog toka) pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika
- da se opseg tačaka konvergencije sa referentne krive podesi tako da FVP u nepovoljnim vremenskim prilikama ni u jednoj tački ne omogućava veću brzinu kretanja (odnosno kraće vreme putovanja) od FVP pod uticajem IVP.

Ovako definisana metodologija modifikacije funkcije vremena putovanja prvenstveno je orjentisana ka procedurama modeliranja opterećenja ulične mreže na makro nivou.

Prethodno predstavljena istraživanja su prikazala uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na elemente saobraćajne ponude i funkciju vremena putovanja. Definisane procedure implementacije i testiranje istraženih uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u modeliranje opterećenja ulične mreže, biće prikazano na primeru Transportnog modela Beograda.

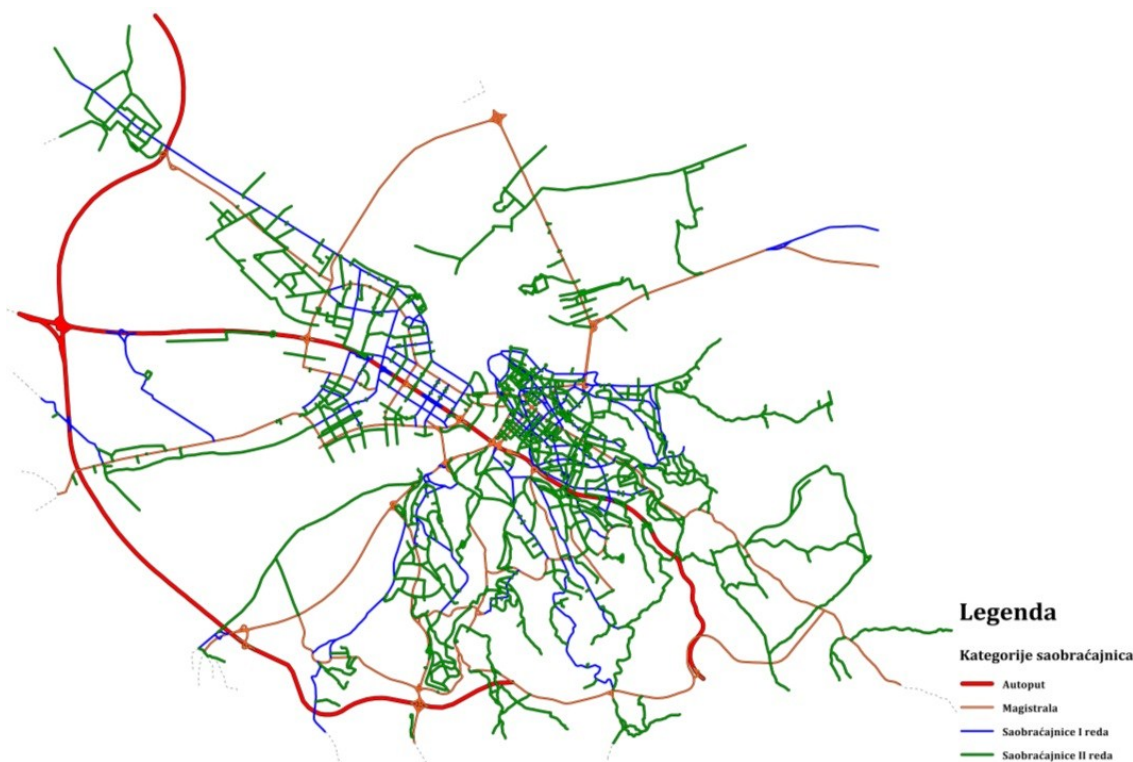
7. TESTIRANJE IMPLEMENTACIJE UTICAJA NEPOVOLJNIH VREMENSKIH PRILIKA U MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE MREŽE

Primena metodologije implementacije uticaja vremenskih prilika u procedure modeliranja saobraćajnog opterećenja predstavljena je na primeru dela ulične mreže Transportnog modela Beograda (TMB). TMB je realizovan u softveru PTV VISUM, i optimiziran je za idealne vremenske prilike.

Transportni model Beograda sadrži (Jović et al., 2015):

- Zonski sistem sa socio-ekonomskim podacima
- Prostorne podatke o uličnoj i putnoj mreži, raskrscima, režimu saobraćaja, priključcima, odnosno podatke o čvorovima i deonicama koji formiraju uličnu i putnu mrežu Beograda
- Mrežu linija sistema javnog gradskog prevoza putnika
- Mrežu teretnog saobraćaja
- Informacionu osnovu o karakteristikama kretanja u Beogradu, tj. podatke o saobraćajnim zahtevima, kretanjima putnika, protocima vozila, brzinama, vremenskim neravnomernostima protoka i drugim pokazateljima stanja saobraćajnog sistema Beograda
- Karakteristike transportnih zahteva (matrice putovanja)
- Procene raspodele saobraćaja na mreži (FVP za deonice i skretanja)

S obzirom da su istraživanja u disertaciji vezana za gradsku uličnu mrežu, iz celokupne putne i ulične mreže definisane transportnim modelom, izdvojen je deo ulične mreže koji se sastoji od 3413 denica u ukupnoj dužini od 928 km. Na narednoj slici je prikazan obuhvat područja u okviru kog je modelirano saobraćajno opterećenje (Slika 21).



Slika 21 Obuhvat područja ulične mreže za potrebe modeliranja

Područjem istraživanja obuhvaćene su i pojedine saobraćajnice čije karakteristike pre odgovaraju putnoj vangradskoj mreži (autoput i obilaznica) nego uličnoj mreži. Realna procena uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na ovim kategorijama saobraćajnica zahteva posebna istraživanja. Imajući u vidu svrhu ovog primera, došlo se do zaključka da je bolje da se na pomenute saobraćajnice primene rezultati uticaja koji su dobijeni na gradskoj uličnoj mreži i da čine sastavni deo analiziranog područja, nego da budu isključene iz procedure raspodele saobraćaja na mreži.

7.1 IMPLEMENTACIJA FUNKCIJE VREMENA PUTOVANJA

U skladu sa prethodnim istraživanjima u proceduru modeliranja će biti implementiran uticaj definisane dve kategorije kiše, KKI i KKII. Procedura implementacije uticaja se sastoji iz nekoliko koraka.

1. Kalibrisanje vrednosti brzine slobodnog toka. Na osnovu utvrđenih vrednosti redukcije brzine slobodnog toka, korigovaće se vrednosti brzina slobodnog toka koje su definisane u baznoj verziji transportnog modela. Intenzitet redukcije će

zavisiti od kategorije nepovoljnih vremenskih prilika. Bez obzira na kategoriju saobraćajnice, relativna vrednost smanjenja brzine slobodnog toka će biti identična. Usled ograničenja u istraživanjima koja su opisana u prethodnom delu, buduća istraživanja bi svakako podrazumevala utvrđivanje koeficijena redukcije za različite kategorije saobraćajnica. Ipak, imajući u vidu da je za područje modeliranja selektovana gradska ulična mreža, pretpostavka je da razlike u relativnim redukcijama brzine slobodnog toka u odnosu na kategoriju saobraćajnice nisu velike.

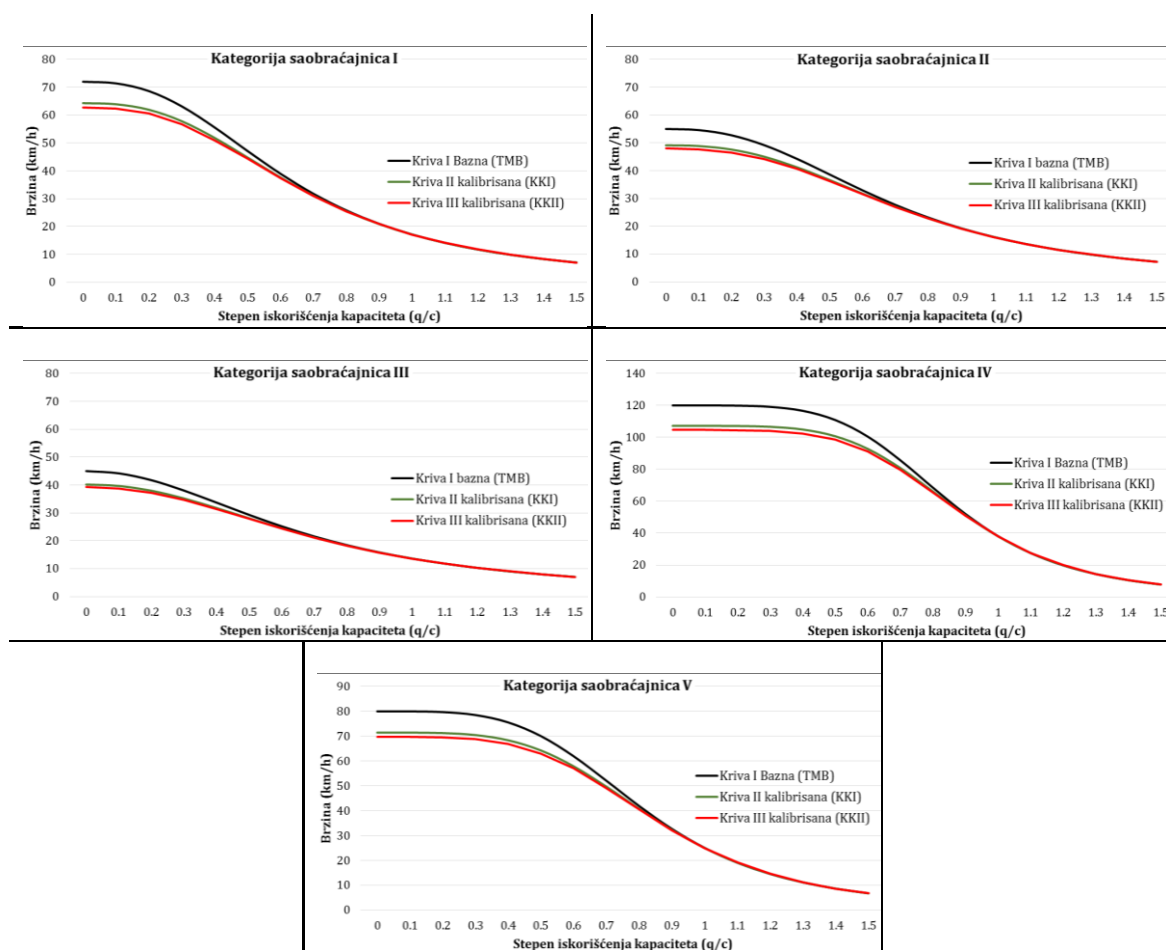
2. Kalibrisanje kapaciteta saobraćajnica i kapaciteta skretanja na raskrnicama. Kao i u slučaju brzine slobodnog toka, prilagođavanje kapaciteta uticaju analiziranih nepovoljnih vremenskih prilika podrazumevaće implementaciju koeficijenata osetljivosti kapaciteta koji su dobijeni istraživanjima. S obzirom da su koeficijenti definisani u opsezima, srednje vrednosti definisanih opsega će za potrebe konkretne simulacije biti iskorišćene kao reprezentativne. Deo osnovne ulične mreže transportnog modela na kojem će se realizovati simulacija sadrži blizu 600 signalisanih raskrnica. Imajući u vidu da je na velikom delu ulične mreže kapacitet usklađivan u odnosu na kapacitete signalisanih raskrsnica, pretpostavka je da se rezultatima istraživanja uticaja osetljivosti kapaciteta ulične mreže na signalisanim raskrnicama može kvalitetno opisati promena u kapacitetu ulične mreže.

3. Kalibrisanje FVP u odnosu na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. U baznoj verziji transportnog modela definisano je devet FVP. Kao model funkcionalne zavisnosti vremena putovanja i stepena iskorišćenja kapaciteta, korišćene su BPR funkcije. U odnosu na tehničke i eksploatacione karakteristike saobraćajnice, za svaku od kategorija je definisana posebna BPR funkcija. Bazne BPR funkcije su definisane na osnovu empirijskih istraživanja vremena putovanja na uličnoj mreži grada Beograda. Svaku od BPR funkcija su, pored različitih vrednosti brzine slobodnog toka, karakterisale i različite vrednosti koeficijenata α i β .

S obzirom da područje predviđeno za simulaciju predstavlja samo deo ulične i putne mreže Transportnog modela Beograda, na obuhvaćenom delu ulične mreže

prisutno je pet različitih kategorija saobraćajnica, odnosno definisano je pet različitih funkcija vremena putovanja.

Na osnovu uspostavljenih zakonitosti u promenama funkcija vremena putovanja pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika koje su opisane u prethodnom poglavlju, primenom programskih kodova (Prilog V i Prilog VI) svaka od funkcija je kalibrisana (Slika 22).



Slika 22 Kalibrisane funkcije vremena putovanja

Svaka od baznih FVP (Kriva I) kalibrisana je u odnosu na uticaj KKI i KKII. Za svaku od kalibrisanih kriva su, uz redukovanu vrednost brzine slobodnog toka, generisane vrednosti koeficijenata α i β .

Navedeni koraci predstavljaju osnovu u prilagođavanju procedure modeliranja saobraćajnog opterećenja. Izbor metode raspodele saobraćajnog opterećenja nije uslovljen uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, već zavisi od baze raspoloživih

podataka, postavljenih ciljeva, zahtevanog nivoa detaljnosti, karakteristika softvera i ostalog.

U modeliranju raspodele opterećenja ulične mreže na konkretnom primeru, korišćen je "Equilibrium Lohse" algoritam. Specifičnost ovog algoritma u odnosu na standardni Equilibrium algoritam, ogleda se u primeni procedure učenja korisnika na uličnoj mreži, jer je u odluku o konačnom izboru trase ugrađeno i iskustvo korisnika iz prethodnih iteracija opterećenja. U prvim iteracijama, saobraćajno opterećenje se raspoređuje na mreži po analogiji metode "sve ili ništa", dok se u narednim iteracijama izbor trase vrši u odnosu na utvrđene vrednosti impedance (otpore) na trasi iz prethodnih iteracija i trenutne vrednosti protoka na trasi (Friedrich, Hofsaß, Nokel, & Vortisch, 2000). Ova metoda raspodele opterećenja na uličnoj mreži zasnovana je na uvažavanju impedansi u kretanjima pri skretanju sa definisanim FVP za čvorove i skretanja. Ukupna impedansa u kretanju predstavlja zbir impedansi na deonici i čvoru.

U cilju evaluacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na performanse transportnog sistema biće prikazana uporedna analiza tri scenarija (Tabela 78).

Tabela 78 Uporedna analiza tri scenarija

Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Bazna verzija TMB	TMB – uticaj KKI	TMB – uticaj KKII

Iako postoji verovatnoća da u realnosti transportni zahtevi menjaju svoje karakteristike pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika, ta problematika nije bila predmet disertacije. Zato je važno istaći da je u svakom od analiziranih scenarija ulična mreža opterećena identičnim transportnim zahtevima, odnosno identičnom izvorno-ciljnom matricom (I-C matrica).

7.2 ANALIZA REZULTATA TESTIRANJA

U primeru je testirano u kojoj meri redukcija brzina, kapaciteta i promena FPV utiče na preraspodelu saobraćajnog opterećenja u modelu.

U Scenariju 2, na 13 novih deonica (0.2%) dolazi do pojave protoka saobraćaja, dok istovremeno na 14 deonica (0.21%) dolazi do gubitka protoka saobraćaja u odnosu

na Scenario 1. U Scenariju 3 na 29 novih deonica (0.4%) dolazi do pojave protoka saobraćaja, dok na 15 deonica (0.23%) dolazi do gubitka protoka saobraćaja u odnosu na Scenario 1. Prosečne vrednosti koeficijenta iskorišćenja kapaciteta (q/c) na deonicama na kojima se pojavljuje novi ili dolazi do gubitka postojećeg protoka saobraćaja su veoma male i kreću se od 0.6 do 2.85%. Na osnovu dobijenih rezultata ne može se steći potpuni utisak o promenama u preraspodeli saobraćajnog opterećenja, ali se može zaključiti da implementacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika nije značajno uticala na promene u iskorišćenosti ulične mreže.

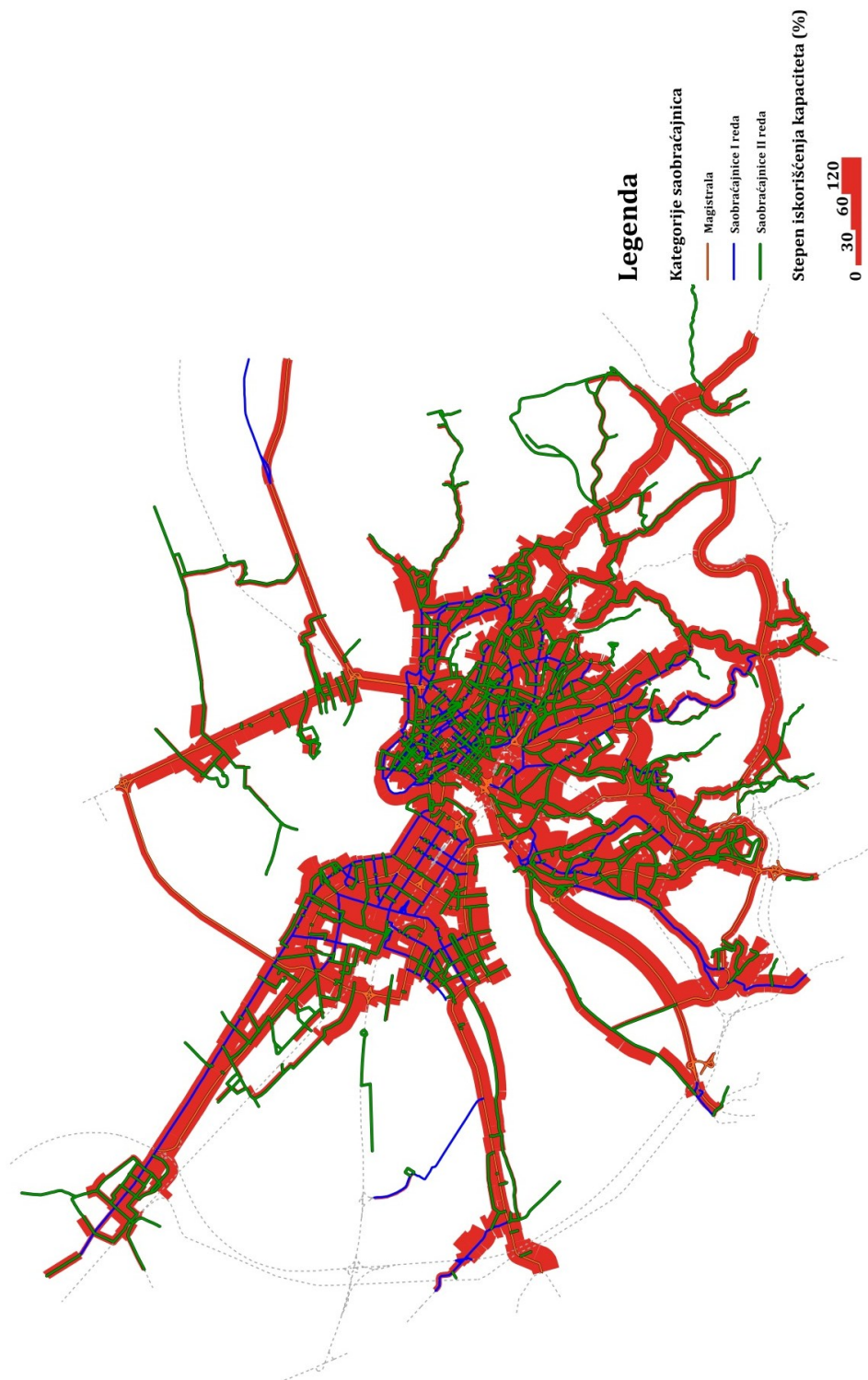
Kako je pomenuto u prethodnom delu, autoput i obilaznica su bili uključeni u proceduru raspodele saobraćaja u sva tri analizirana scenarija. Međutim, iz uporedne analize pokazatelja modeliranih scenarija, ove kategorije saobraćajnica su izuzete. Na narednoj slici je predstavljen deo ulične mreže za koji je realizovana uporedna analiza pojedinih saobraćajnih parametara sa prikazom stepena iskorišćenja kapaciteta za Scenario 1 (Slika 23).

Opšti pokazatelji rezultata implementacije uticaja definisanih kategorija nepovoljnih vremenskih prilika na deo ulične mreže obuhvaćen modelom prikazani su u tabeli 79.

Tabela 79 Opšti pokazatelji modeliranih scenarija

	Scenario1	Scenario2	Scenario3
Suma prosečnog vremena putovanja na deonicama	63:59:30	70:38:10	76:11:05
Ukupno vreme putovanja (vozčas)	22203:55:27	24317:54:26	26844:54:26
Transportni rad (vozkkm)	482092.4	483634.3	486726.6

Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika značajno je uticao na povećanje sume vremena putovanja na deonicama. U slučaju Scenarija 2 povećanje iznosi 10% (6h 38min i 40sek), dok je u slučaju Scenarija 3 povećanje skoro udvostručeno i iznosi 19% (12h 11min i 35sek). Kada je reč u ukupnom vremenu putovanja izraženom u časovima po vozilu (vozčas), situacija je slična. Povećanje ukupnog vremena putovanja vozila na mreži u Scenariju 2 kreće se oko 9.5% (2113h 58min i 59sek), dok u Scenariju 3 povećanje iznosi 20.9% (4640h 58min i 59sek).



Slika 23 Stepen iskorišćenja kapaciteta za analizirani deo ulične mreže (Scenario1)

Interesantno je da se transportni rad izražen u kilometrima po vozilu (vozk) nije bitno povećao, odnosno u oba scenarija povećanja su manja od 1% (Scenario 1 - 0.32%; Scenario 2 - 0.96%). Ovako dobijeni rezultati transportnog rada pokazuju da implementacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika ne doprinosi promenama u trasi kretanja korisnika. Nepovoljne vremenske prilike ostvaruju negativne uticaje na kompletnoj uličnoj mreži. Na taj način se ne doprinosi favorizovanju alternativnih trasa kretanja, što može biti obrazloženje koje ide u prilog ovako dobijenim rezultatima iz modela.

Promene u vrednostima stepena iskorišćenja kapaciteta ulične mreže u analiziranim scenarijima su prikazane u tabeli 80. Prosečne vrednosti stepena iskorišćenja kapaciteta na deonicama u Scenariju 1 su podeljene u kategorije (kolona1).

Tabela 80 Upporedna analiza izlaznih rezultata za posmatrane scenarije

Kategorije stepena iskorišćenja kapaciteta na deonici	Relativna promena u odnosu na Scenario1					
	Stepen iskorišćenja kapaciteta (% povećanja)		Prosečne vrednosti vremena putovanja na deonici (% povećanja)		Prosečne vrednosti brzine na deonici (% smanjenja)	
	Scenario2	Scenario3	Scenario2	Scenario3	Scenario2	Scenario3
0 - 0.1	0.02	0.26	14.9	18.5	11.75	14.29
0.1 - 0.2	0.58	2.35	12.8	17.5	10.57	14
0.2 - 0.3	0.8	3.18	11.8	17.8	9.96	13.9
0.3 - 0.4	1.41	4.28	11.9	18.4	9.36	14
0.4 - 0.5	1.8	5.2	10.5	18.4	8.72	14.4
0.5 - 0.6	2.3	6.1	9.54	17.8	8.38	14.6
0.6 - 0.7	2.9	7	9.25	19.1	8.21	15.34
0.7 - 0.8	3.33	8.1	9.56	20.7	7.67	16.13
0.8 - 0.9	3.63	8.9	8.42	20.3	7.19	16.2
0.9 - 1	3.7	9.5	8.82	21.3	7.85	17.2
>1	5.3	12.9	9.49	23.73	8.10	18.8

Deonice sa većim stepenom iskorišćenja u baznoj varijanti modela su osetljivije na uticaj definisanih kategorija kiše. Posmatrajući osetljivost vrednosti stepena iskorišćenja pod uticajem KKI, povećanje se kreće od 0.02% za deonice sa najmanjim stepenom iskorišćenja kapaciteta do 5.3% za deonice sa stepenom iskorišćenja preko 1. Povećanje stepena iskorišćenja pod uticajem KKII je intenzivnije, ali sa sličnim trendom promene i kreće se od 0.26% za slabo opterećene deonice, do 12.9% za deonice sa stepenom iskorišćenja kapaciteta preko 1. Rezultati modeliranja su prikazali značajnu osetljivost prosečne vrednosti vremena putovanja na deonicama i prosečne brzine kretanja vozila pod uticajem

KKI i KKII. Posmatrajući dobijene promene u okviru definisanih klasa stepena iskorišćenja kapaciteta bilo bi veoma teško ustanoviti prirodu korelacije. Na nivou kompletne mreže prosečno vreme na deonicama se povećalo za 10.6% pod uticajem KKI, dok je uticaj KKII prouzrokovao povećanje od 19.4%. Modelom je dobijeno i smanjenje prosečne brzine kretanja vozila na deonici pod uticajem KKI i KKII od 8.8% odnosno 15.3%.

Karakteristike softvera koji je korišćen u formiranju transportnog modela su omogućile da se za analizirane scenarije modelira i emisija aerozagađenja. Izračunavanje emisije aerozagađenja za putničke automobile i teretna vozila je bazirano na utvrđenim modelima emisije aerozagađenja koji su definisani od strane Sekretarijata za zaštitu životne sredine Švajcarske (BAFU) za zagađivače NO_x CO, HC i SO₂ (PTV Visum). Model emisije aerozagađenja implementiran u softver formulisan je na sledeći način:

$$E_{\text{miss}} = a + b \cdot v + c \cdot v^2 + d \cdot v^3 + e \cdot v^4 + f \cdot v^5$$

v – prosečna brzina

a,b,c,d,e i f – parametri koji se određuju posebno za svaki od zagađivača i vrstu vozila (putnički automobil ili teretno vozilo).

Na osnovu formulacije može se videti da je model baziran na vrednostima prosečne brzine kretanja vozila i definisanih parametara. Parametri primenjenog modela su definisani 2000. godine i postoji verovatnoća da bi za lokalne uslove bilo potrebno izvršiti njihovu korekciju. Imajući to u vidu, kao i činjenicu da je reč o velikom obuhvatu ulične mreže, izlazni rezultati primenjenog modela mogu se shvatiti kao deskriptivni. Promene u prosečnim vrednostima analiziranih veličina predstavljeni su u tabeli 81.

Tabela 81 Uticaj KKI i KKII na emisiju aerozagađenja

Polutanti (g/km)	Scenario 2	Scenario 3
CO	6.0	10.8
NO _x	-0.4	-0.6
SO ₂	4.6	8.8
HC	5.9	10.9

Iz tabele se vidi da, osim u slučaju NO_x , kod ostalih polutanata dolazi do povećanja u vrednostima emisije pod uticajem definisanih kategorija kiše. U okviru disertacije, ova tematika nije detaljnije tretirana, ali dobijeni rezultati ukazuju na to da treba posvetiti pažnju i ovom aspektu uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na transportni sistem.

U konkretnom primeru su rezultati istraživanja sa mikro nivoa implementirani na makro nivo. Na taj način je ostvaren i osnovni cilj konkretnog primera, jer su rezultati dobijeni na makro nivou dosta jasnije ukazali na značajnost tretiranja uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na transportni sistem.

Dobijeno je da se smanjenjem kapaciteta od 4%(za KKI) do 9.8% (za KKII) i smanjenjem brzine slobodnog toka od 10.7% (za KKI) do 12.85% (za KKII), vreme putovanja na uličnoj mreži obuhvaćenoj modelom povećava za oko 10% (za KKI) odnosno oko 20% (za KKII). Pri tome ne treba izostaviti i činjenicu da su FVP kalibrisane prema definisanim kategorijama nepovoljnih vremenskih prilika. Male razlike u transportnom radu u odnosu na analizirane scenarije pokazuju da nepovoljne vremenske prilike utiču na povećanje stepena zagušenja na primarnim, odnosno najopterećenijim saobraćajnicama. Ova pojava negativno utiče na performanse čitavog saobraćajnog sistema i posebno daje na značaju analize ove vrste uticajnog faktora.

Apsolutno poklapanje rezultata iz konkretnog primera sa rezultatima uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na vreme putovanja i brzinu kretanja vozila koji su dobijeni iz istraživanja, nije bilo moguće očekivati iz nekoliko razloga:

- metodologija empirijskog utvrđivanja FVP u inicijalnom modelu (Scenario 1) bazirana je na vremenu putovanja na trasi, dok su istraživanja u disertaciji orjentisana na deonicu.
- u baznom scenariju u modelu (Scenario 1) na oko 9% deonica vrednost stepena iskorišćenja kapaciteta prelazi 0.94. Sa druge strane, maksimalna vrednost stepena iskorišćenja zabeležena u istraživanjima iznosi 0.94.

- uticaj nepovoljnih vremenskih prilika je kroz istraživanja posmatran izolovano u odnosu na ostale uticaje. U transportnom modelu je kapacitet deonice definisan uzimajući u obzir faktor uticaja javnog prevoza, parkiranja i strukture saobraćajnog toka.

Bazni model (Scenario 1) prošao je proceduru kalibracije u odnosu na izmerene intenzitete saobraćaja u skretanjima na velikom broju raskrsnica. Validacijom rezultata kalibracije potvrđen je kvalitet formiranog modela. Usled ograničenih resursa i kompleksnosti istraživanja u okviru disertacije nisu postojale mogućnosti za kalibraciju i validaciju rezultata modela dobijenih nakon implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Ono što se može zaključiti je da u konkretnom slučaju kalibracija ne bi mogla da bude bazirana na intenzitetu saobraćajnih tokova, kao što je to bio slučaj za baznim modelom. Osnovni razlog za to predstavlja nepoznanica uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na transportne zahteve što u okviru disertacije nije analizirano. Na osnovu toga, kalibraciju modela bi trebalo realizovati kroz snižavanje brzina ili vremena putovanja na uličnoj mreži. Utvrđivanje neophodnih elemenata i metodologije za kalibraciju transportnog modela pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika predstavlja jedan od pravaca daljih istraživanja.

8. ZAKLJUČAK

U odnosu na hipoteze koje su postavljene u disertaciji, na osnovu rezultata istraživanja može se konstatovati da je svaka od postavljenih hipoteza potvrđena. Dokazivanje postavljenih hipoteza je, kao što je više puta i istaknuto u prethodnom tekstu, analizirano iz aspekta uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na elemente transportne ponude.

Pokazano je da bez obzira na stepen razvijenosti saobraćajnog sistema, nepovoljne vremenske prilike utiču na redukciju funkcionalne efikasnosti sistema. S obzirom na to, prvi korak u proceduri adaptacije saobraćajnog sistema uticaju nepovoljnih vremenskih prilika predstavlja kvantifikacija analiziranog uticaja. Imajući u vidu dinamičnost saobraćajnog sistema i vremenskih prilika, kvantifikacija uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem predstavlja kompleksan zadatak.

Usled visokog stepena urbanizacije i porasta saobraćaja postalo je posebno značajno pažnju posvetiti svim potencijalnim negativnim uticajima na performanse saobraćajnog sistema. To je u velikoj meri doprinelo intenzivnijem istraživanju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem. Sa druge strane i aktuelni problemi klimatskih promena su dodatno skrenuli pažnju na analizu promena karakteristika vremenskih prilika, kao i na njihove moguće posledice.

Sveobuhvatan pristup analizi uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem podrazumeva istraživanja i na strani transportne ponude i na strani transportnih zahteva. Međutim, tematika disetracije je bazirana isključivo na ispitivanju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na performanse ponude transportnog sistema. Fokus je stavljen na kvantifikaciju osetljivosti osnovnih elemenata ponude saobraćajnog sistema na analizirani uticaj i na implementaciju faktora uticaja u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže.

Za područje istraživanja, u okviru disertacije, izabrana je ulična mreža grada Beograda. Razvijena ulična mreža i intenzivna saobraćajna opterećenja, posebno

izražena u vršnim periodima, preporučili su glavni grad Republike Srbije pogodnim za istraživanja ove vrste.

Zbog formiranja jasnije predstave o klimatskim karakteristikama Beograda praćene su vrednosti osnovnih klimatskih elemenata u periodu od četiri godine (od 2012. do 2015. godine). Na osnovu prikupljenih podataka dobijeno je da u kontekstu nepovoljnih vremenskih prilika najveće učešće uzima kiša. Za period od četiri analizirane godine ukupno je zabeleženo 2063 časova sa kišom različitog intenziteta što je negde oko 5.8% od ukupnog broja časova.

Za kategorizaciju kiše, u skladu sa tematikom istraživanja, razvijena je posebna metodologija kojom se pored intenziteta kiše u obzir uzimala i zastupljenost kiše određenog intenziteta na području istraživanja. Kod svih prethodnih istraživanja iz ove oblasti kategorizacija je bila bazirana isključivo na intenzitetu kiše. Kao i proces optimizacije i modeliranje se veoma retko realizuje za ekstremne scenarije, odnosno za scenarije sa malom verovatnoćom pojave. Primenom razvijene metodologije kategorizacije, stvoreni su preduslovi da se u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže implementiraju uticaji koji su karakteristični za istraživano područje. Za kategorizaciju kiše primenjen je K-means metod na osnovu kojeg su formirane tri kategorije kiše. Pored kiše, okolnosti su omogućile da se kao kategorija vremenskih prilika razmatra i uticaj snega sa bljuzgavicom (SSB).

Jedan od najznačajnijih elemenata ponude transportnog sistema je kapacitet ulične mreže. Povećanjem stepena motorizacije i smanjenim mogućnostima urbanih sredina da proširenjem kapaciteta deluju u pravcu zadovoljenja ispostavljenih transportnih zahteva, obezbeđenje neophodnog kapaciteta je postalo svojevrsan izazov. Zbog toga, svaki potencijalni uticaj koji bi doveo do redukovanja postojećeg kapaciteta potrebno je kvantifikovati i shodno rezultatu uzeti ga u obzir.

Osetljivost kapaciteta ulične mreže istraživana je indirektno kroz promenu vrednosti zasićenog saobraćajnog toka na signalisanim raskrsnicama pod uticajem analiziranih nepovoljnih vremenskih prilika. Kroz istraživanje su minimizirani i

eliminirani svi ostali potencijalni uticaji koji bi onemogućavali izolovanu evaluaciju uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Analiziran je 1331 ciklus, što je činilo bazu od 14710 zabeleženih intervala sleđenja.

Za potrebe istraživanja postojeća metodologija utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka je nadograđena, čime je povećan nivo osetljivosti i preciznosti identifikovanih promena kao posledice uticaja nepovoljnih vremenskih prilika. Vrednost zasićenog saobraćajnog toka je proračunavana za merodavan niz vozila u procesu pražnjenja reda na raskrsnici, koji je determinisan primenom Man-Whitney U testa.

Kao rezultat ovog dela istraživanja generisani su koeficijenti osetljivosti kapaciteta ulične mreže za svaku od kategorija nepovoljnih vremenskih prilika. Koeficijenti osetljivosti kapaciteta su implementirani u standardnu proceduru proračuna kapaciteta, sa svrhom redukovanja bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka koja se utvrđuje pod idealnim vremenskim prilikama. Definisanim koeficijentima, redukcija se u odnosu na analizirane kategorije uticaja kreće od 2.2 do 37%.

Uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem je istraživani i kroz analizu promene vrednosti različitih kategorija brzine (brzina vozila u nizu, brzina prvog vozila u redu, brzina slobodnog toka). Prilikom istraživanja osetljivosti brzine kretanja vozila na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika, uzet je u obzir samo uticaj definisanih kategorija kiša.

Rezultati istraživanja su pokazali da kiša značajno utiče na redukciju brzine kretanja vozila na nivou svih posmatranih kategorija. Zabeležene redukcije brzine se kreću od 5.7 do 12%. Kada je reč o brzini slobodnog toka, veću redukciju brzine izaziva pojava kiše, u odnosu na redukcije brzine koje su identifikovane između definisanih kategorija kiše (KKI i KKII). Takođe su rezultati pokazali da kiša identičnog intenziteta u većoj meri utiče na redukciju brzine slobodnog toka nego kod brzine kretanja vozila pri određenim vrednostima protoka saobraćaja.

Ispitane su i promene u vremenu putovanja pri različitim vrednostima koeficijenta iskorišćenja kapaciteta, pod uticajem definisanih kategorija kiše. Ovako

koncipirane zavisnosti su u procedurama modeliranja opterećenja ulične mreže poznate pod nazivom funkcije vremena putovanja (FVP). Kada se u modeliranju raspodele opterećenja ulične mreže za osnovni kriterijum usvoji vreme putovanja, FVP predstavljaju jedan od najvažnijih ulaznih parametara modeliranja. Brzina slobodnog toka, odnosno vreme putovanja pri brzini slobodnog toka i kapacitet su veličine koje figurišu u svakoj FVP.

Za potrebe prilagođavanja, odnosno modifikacije FVP uticaju nepovoljnih vremenskih prilika razvijena je posebna metodologija. Zaključeno je, da vreme putovanja pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika konvergira vrednostima vremena putovanja pod idealnim vremenskim prilikama za kritične vrednosti koeficijenta iskorišćenja kapaciteta. Ovakva konstatacija je inicirana dobijenim rezultatima koji su ukazali na to da intenzitet uticaja nepovoljnih vremenskih prilika, konkretno kiše, opada sa porastom koeficijenta iskorišćenja kapaciteta. U tom slučaju, preovlađujući uticaj u povećanju vremena putovanja preuzima međusobna interakcija između vozila. Iako je u konkretnom primeru korišćena BPR funkcija vremena putovanja, razvijenu metodologiju modifikacije karakteriše opšta primenljivost bez obzira na korišćeni tip FVP. Imajući u vidu značaj FVP u proceduri modeliranja opterećenja ulične mreže, implementacijom uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u FVP, dat je doprinos funkcionalnosti modela koji se primenjuju u planiranju saobraćaja.

Testiranje i verifikacija metodologije implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže realizovano je na primeru Transportnog modela Beograda. Rezultati modeliranja su na analiziranom delu ulične mreže pokazali značajna povećanja u ukupnom prosečnom vremenu putovanja na deonicama koje se kretalo od 10% (pod uticajem KKI) do 19% (pod uticajem KKII). Kod transportnog rada koji je izražen u voz/km zabeležene su veoma male promene. Razlog tome je što usled delovanja nepovoljnih vremenskih prilika nijedna od alternativnih ruta ne dobija na atraktivnosti jer se kompletnoj uličnoj mreži redukuju performanse. Na taj način se stepen iskorišćenja kapaciteta na najopterećenijim saobraćajnicama pod uticajem nepovoljnih vremenskih prilika dodatno povećava što negativno utiče na

saobraćajni sistem. Ovaj efekat posebno daje na značaju analize uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na ponudu saobraćajnog sistema. I dobijeni rezultati vezani za promene u emisijama štetnih gasova pod analiziranim uticajem, ukazuju na to da i u kontekstu održivosti saobraćajnog sistema uticaj nepovoljnih vremenskih prilika ne treba da bude izostavljen iz procesa modeliranja.

Osnovne hipoteze koji su postavljene u disertaciji odnosile su se na to da vremenske prilike utiču na karakteristike opterećenja ulične mreže, da je moguće kvantifikovati uticaj vremenskih prilika na opterećenje ulične mreže i da od intenziteta i vrste vremenskih prilika zavisi i intenzitet uticaja na opterećenje ulične mreže.

Rezultati istraživanja su pokazali osetljivost kapaciteta i brzine na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika. Analizirani parametri predstavljaju osnovu u kodiranju ulične mreže što je preduslov za modeliranje opterećenja ulične mreže. Takođe, rezultati implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u Transportni model Beograda jasno potvrđuju da dolazi do promena u karakteristikama opterećenja ulične mreže.

Generisanjem koeficijenata osetljivosti kapaciteta uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na kapacitet ulične mreže je kvantifikovan. Na osnovu vrednosti koeficijenata, može se uočiti korelacija između intenziteta nepovoljnih vremenskih prilika i intenziteta uticaja. Takođe, pod uticajem različitih tipova nepovoljnih vremenskih prilika generisane su različite vrednosti koeficijenata osetljivosti, a time je potvrđena i hipoteza da od intenziteta i vrste vremenskih prilika zavisi i intenzitet delovanja na karakteristike opterećenja ulične mreže. Slična je situacija kada je reč i o istraživanjima koja se odnose na promene u brzini kretanja vozila pod uticajem analiziranih nepovoljnih vremenskih prilika. Jedino što u tom slučaju nedostaje je deo dokaza koji se odnosi na uticaj različitih tipova vremenskih prilika, jer je kompletna analiza realizovana u odnosu na različite kategorije kiše.

Utvrđena osetljivost ponude saobraćajnog sistema na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika ne podrazumeva optimizaciju ponude saobraćajnog sistema

prema dobijenim rezultatima. Implementacijom uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u proceduru modeliranja opterećenja ulične mreže omogućeno je kvalitetnije testiranje ponude saobraćajnog sistema u različitim scenarijima planiranog razvoja. Veoma je značajno unapred raspolagati mogućim efektima i posledicama redukovanja elemenata transportne ponude zbog definisanja pravaca delovanja kako na strateškom tako i na operativnom nivou. Zbog toga se u proceduru optimizacije i upravljanja transportnom ponudom preporučuje implementacija analiziranog faktora uticaja.

U područjima sa sličnim klimatskim karakteristikama i karakteristikama ponašanja učesnika u saobraćaju, kvantifikovane vrednosti uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na analizirane elemente transportne ponude mogu biti primenjene. Razvijenu metodologiju implementacije uticaja nepovoljnih vremenskih prilika u modeliranje opterećenja ulične mreže na makro nivou karakteriše opšta primenljivost bez obzira na područje istraživanja.

Pravci budućih istraživanja

Sveobuhvantost uticaja nepovoljnih vremenskih prilika na saobraćajni sistem, kao i postojeća ograničenja u realizovanim istraživanjima, ostavljaju dosta prostora za bavljenje ovom problematikom i u budućnosti. Na osnovu rezultata istraživanja i iznetih zaključaka definisani su pravci budućih istraživanja:

- *Proširenje obuhvatnosti istraživanja.* Veća obuhvatnost bi se u ovom kontekstu odnosila na prostorni obuhvat i veći nivo detaljnosti. Buduća istraživanja bi podrazumevala formiranje mreže automatskih mernih stanica kako bi bilo moguće raspolagati bazom meteoroloških podataka na širem gradskom području. Razvoj sistema monitoringa raskrsnica i implementacija savremenih elemenata saobraćajne infrastrukture kao što su detektori ili automatski brojači značajno bi doprineo kvalitetnijoj realizaciji istraživanja ove vrste. Navedena infrastruktura bi omogućila i jednostavnu kalibraciju formiranog

transportnog modela u koji je implementiran uticaj nepovoljnih vremenskih prilika.

Nivo detaljnosti podrazumeva da buduća istraživanja budu fokusirana na obuhvatanje većeg broja različitih kategorija saobraćajnica i tipova raskrsnica.

Bilo bi značajno uporediti rezultate istraživanja u više različitih gradova i klimatskih zona radi utvrđivanja da li se otpornost na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika razlikuje za gradove različitih karakteristika, različitih saobraćajnih sistema i mentaliteta stanovnika.

- *Razvoj arhitekture sistema prilagođavanja upravljanja saobraćajem u odnosu na nepovoljne vremenske prilike.* Bilo bi neophodno istražiti uticaj nepovoljnih vremenskih prilika na vremenske gubitke na raskrsnici i vezu između načina upravljanja svetlosnim signalima i efekata nepovoljnih vremenskih prilika. Pri tome bi se moralo voditi računa o tipu i veličini raskrsnica, o rastojanjima između raskrsnica, uticaju strukture saobraćajnog toka i drugim činiocima značajnim za analizu na mikro nivou. Takođe, neophodno bi bilo uspostaviti kvalitetnu komunikaciju između institucija koje se bave praćenjem i prognozom meteoroloških podataka i centra za upravljanje saobraćajem. Potrebno je definisati sa kojom preciznošću i na kojim vremenskim intervalima je moguće prognozirati pojavu nepovoljnih vremenskih prilika. Veoma je značajan i nivo pouzdanosti informacija o peridu trajanja nepovoljnih vremenskih prilika, jer treba imati u vidu da je potrebno određeno vreme za odziv učesnika u saobraćajnom sistemu na promene.

Preduslov za delovanje u ovom pravcu daljeg istraživanja, predstavljalo bi ispitivanje opravdanosti implementacije ovakvog sistema. Sa jedne strane, morala bi se kvantifikovati ulaganja koja su neophodna za implementaciju sistema, dok bi sa druge strane bilo neophodno kvantifikovati koristi od njegove implementacije.

Kako je navedeno u početnim poglavljima disertacije, promenljivost vremenske i prostorne komponente nepovoljnih vremenskih prilika u velikoj meri utiče na

složenost analize njihovog uticaja na saobraćajni sistem. Međutim, istovremeno predstavlja i veliki izazov imajući u vidu da je reč o svakodnevnim pojavama koje čine sastavni deo naših života.

9. LITERATURA

- Aashtiani, H. Z., & Iravani, H. (2002). Application of Dwell Time Functions in Transit Assignment Model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1817, 88–92.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/1817-11>
- Agarwal, M., Maze, T. H., & Souleyrette, R. (2005). Impacts of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity. In *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium* (p. 14). 18-19 August, Ames, Iowa. Retrieved from
<http://www.ctre.iastate.edu/pubs/midcon2005/#weather>
- Agbolosu-Amison, S., Sadek, A., & ElDessouki, W. (2004). Inclement Weather and Traffic Flow at Signalized Intersections: Case Study from Northern New England. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1867, 163–171.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/1867-19>
- Akcelik, R. (1981). *Traffic signals: Capacity and timing analysis*. Australian Road Research Board. Research report ARR ; no. 123.
- Akcelik, R. (1991). Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time dependent form and alternative travel time function. *Australian Road Research*, 21(3), 49–59. Retrieved from
<http://arbknowledge.com>
- Akin, D., Sisiopiku, V. P., & Skabardonis, A. (2011). Impacts of Weather on Traffic Flow Characteristics of Urban Freeways in Istanbul. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 16, 89–99. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.432>
- Alhassan, H. M., & Ben-Edigbe, J. (2011). Highway Capacity Loss Induced by Rainfall. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 1(6), 635–638.
<http://doi.org/10.18517/ijaseit.1.6.127>
- Asamer, J., & Van Zuylen, H. (2012). Saturation Flow Under Adverse Weather Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2258, 103–109.

- <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/2258-13>
- Bernardin Lochmueller and Associates. (1995). *Anchorage Signal System Upgrade, Final report*. Bernardin Lochmueller and Associates, Inc. Evansville, Indiana. Retrieved from <http://www.ops.fhwa.dot.gov/>
- Botha, B. J. L., & Kruse, T. R. (1992). Flow Rates at Signalized intersections Under Cold Winter Conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 118(3), 439–450. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1992\)118:3\(439\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:3(439))
- Boyce, D. E., Janson, B. N., & Eash, R. W. (1981). The effect on equilibrium trip assignment of different link congestion functions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 15(3), 223–232. [http://doi.org/10.1016/0191-2607\(81\)90003-0](http://doi.org/10.1016/0191-2607(81)90003-0)
- Branston, D. (1976). Link capacity function: A review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 10(2-3), 223–236. [http://doi.org/doi:10.1016/0041-1647\(76\)90055-1](http://doi.org/doi:10.1016/0041-1647(76)90055-1)
- Braybrooke, D., & Lindblom, C. E. (1963). *A strategy of decision: Policy Evaluation as a Social Process*. New York:Free Press.
- Breiman, L., Friedman, J., Stone, C., & Olshen, R. (1984). *Classification and Regression Trees (Wadsworth Statistics/Probability)*. London, Chapman and Hall/CRC.
- Brilon, W., & Ponzlet, M. (1996). Variability of speed-flow relationships on German autobahns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1555(1), 91–98. <http://doi.org/10.3141/1555-12>
- Bureau of Public Roads. (1964). *Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer*. Washington, D.C.:U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, Urban Planning Division.
- Cambridge Systematics Inc. (2005). *Traffic congestion and reliability: Trends and advanced strategies for congestion mitigation, Final report. Federal Highway Administration, USA*.
- Campbell, E. W., Keefer, L. E., & Adams, R. W. (1959). A method for predicting speeds through signalized street sections. *Highway Research Board Bulletin*, 230, 112–125.
- Čelar, N. (2007). *Prilog istraživanju merodavnih vrednosti zasićenog saobraćajnog*

toka na signalisanim raskrsnicama. Magistarska teza. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.

Čelar, N. (2013). *Prilog analizi saobraćajnog procesa na signalisanoj raskrsnici*.

Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet. Retrieved from https://phaidrabi.bg.ac.rs/detail_object/o:7286?tab=0#mda

Chao, C., Alexander, S., & Pravin, V. (2003). Travel-Time Reliability as a Measure of Service. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1855, 74–79.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/1855-09>

Chen, Y., Mahmassani, H. S., Hong, Z., Hou, T., Kim, J., Halat, H., & Alfelor, R. M. (2015). Online Implementation and Evaluation of Weather-Responsive Coordinated Signal Timing Operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2488, 71–86.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/2488-08>

Chien, S. I., & Kolluri, K. K. (2010). Evaluation of Freeway Travel Time Variability and Reliability under Adverse Weather with TRANSMIT Data. In *Transportation Research Board 89th Annual Meeting* (p. 16). 10-14 January, Washington DC, United States.

Chodur, J., Ostrowski, K., & Tracz, M. (2011). Impact of saturation flow changes on performance of traffic lanes at signalised intersections. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service* (pp. 600–611). June 28 - July 1, Stockholm, Sweden.

Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811010263>

Choi, S., & Oh, C. (2016). Proactive Strategy for Variable Speed Limit (VSL) Operations on Freeways under Foggy Weather Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2551, 29–36.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/2551-04>

Chung, E., Ohtani, O., Warita, H., Kuwahara, M., & Morita, H. (2006). Does Weather Affect Highway Capacity. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service. Country Reports and Special Session Papers* (pp. 139–146). 25-29 July, Yokohama, Japan. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/229048395_Does_weather_affect_highway_capacity

Cools, M., Moons, E., Creemers, L., & Wets, G. (2010). Changes in travel behavior in response to weather conditions: whether type of weather and trip purpose matter? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2157, 22–28.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.3141/2157-03>

Daganzo, C. F. (2005). Improving City Mobility through Gridlock Control: an Approach and Some Ideas. Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley.

Davidson, K. B. (1966). A flow travel time relationship for use in transportation planning. In *Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 3rd* (pp. 183–194). 5-9 September, Sydney, Australia. Retrieved from <http://arrbknowledge.com>

Davis, G. A., & Xiong, H. (2007). *Access to Destinations: Travel Time Estimation on Arterials*. Center for transportation studies, ITS Institute, University of Minnesota. Retrieved from <http://www.its.umn.edu/Publications/ResearchReports/reportdetail.html?id=1528>

Ding, Z., Zhao, F., & Wu, Y. (2009). Artificial neural network delay model for traffic assignment incorporating intersection delay costs. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2132), 25–32. <http://doi.org/10.3141/2132-03>

Đorić, V. (2013). *Istraživanje i modeliranje emisija vozila u funkciji modeliranja saobraćajnih tokova na uličnoj mreži*. Magistarska teza. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.

Dowling, R., & Skabardonis, A. (2008). Urban Arterial Speed-Flow Equations For Travel Demand Models. In *A Transportation Research Board Conference, Inovations in Travel Demand Modeling Conference* (pp. 109–113). 21-23 May, Austin, Texas.

Ebeling, C. E. (1997). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. McGraw-Hill.

- FGSV. (2001). *Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS, German Highway Capacity Manual)*. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag GmbH.
- Florian, M., & Nguyen, S. (1976). An application and validation of equilibrium trip assignment methods. *Transportation Science*, 10(4), 374–390.
<http://doi.org/10.1287/trsc.10.4.374>
- Friedrich, M., Hofsaß, I., Nokel, K., & Vortisch, P. (2000). A Dynamic Traffic Assignment Method for Planning and Telematic Applications. In *Proceedings of Seminar K, European Transport Conference* (pp. 29–40). 11-13 September, Cambridge, United Kingdom. Retrieved from http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publication/downloads/200009_Fr_DTA_ETC.pdf
- Gillam, W. J., & Wilhill, R. a. (1992). UTC and inclement weather conditions. In *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Conference, Road Traffic Monitoring (IEE Conf. Pub. 355)*. April, Leicestershire County Council & the University of Nottingham, United Kingdom.
- Gradski zavod za zaštitu zdravlja Beograd. (2002). *Ekološki atlas Beograda*. Retrieved from <http://www.zdravlje.org.rs/ekoatlas/indexs.html>
- Haider, M., & Spurr, T. (2006). The design and development of large-scale traffic assignment models using geographic information systems. In *Transportation Research Board 85th Annual Meeting* (p. 24). 22-26 January, DC Washington.
- Hartigan, J. A. (1975). *Clustering Algorithms*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hassan, Y. Al, & Barker, D. J. (1999). The impact of unseasonable or extreme weather on traffic activity within Lothian region, Scotland. *Journal of Transport Geography*, 7(3), 209–213.
[http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0966-6923\(98\)00047-7](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0966-6923(98)00047-7)
- Hawkins, R. K. (1988). Motorway traffic behaviour in reduced visibility conditions. In *Vision in Vehicles II. Second International Conference on Vision in Vehicles* (pp. 9–18). 14-17 September, Nottingham, United Kingdom.
- Highway capacity manual. (2000). *Transportation Research Board*.
- Highway capacity manual. (2010). *Transportation Research Board*.
- Hogema, J. H. (1996). *Effects of rain on daily traffic volume and on driving behaviour*. Report TNO-TM-96-8019, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands.

- Holden, D. J. (1989). Wardrop's Third Principle: Urban traffic congestion and traffic policy. *Journal of Transport Economics and Policy*, 23(3), 239–262. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/20052890>
- Horowitz, A. (1991). *Delay-Volume Relations for Travel Forecasting: Based on the 1985 Highway Capacity Manual*. Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation. Retrieved from https://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other_reports/delay_volume_relations/ch09.cfm
- Hranac, R., Sterzin, E., Krechmer, D., Rakha, H., & Farzaneh, M. (2006). *Empirical Studies on Traffic Flow in Inclement Weather*. Report FHWA-HOP-07-073, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation. Retrieved from <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/weatherempirical/weatherempirical.pdf>
- Ibrahim, A. T., & Hall, F. L. (1994). Effect of adverse weather conditions on speed-flow-occupancy relationships. *Transportation Research Record*, (1457), 184–191. Retrieved from <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1457/1457-022.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007, Mitigation of Climate Change, Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4_wg3_full_report.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf
- Irwin, N. A., Dodd, N., & Von Cube, G. H. (1961). Capacity Restraint in Assignment Programs. In *Highway Research Board Bulletin, 40th Annual Meeting of the Highway Research Board* (pp. 109–127). 9-13 January, Washington DC, United

States.

- Ivanović, I., Grujičić, D., Macura, D., Jović, J., & Bojović, N. (2013). One approach for road transport project selection. *Transport Policy*, 25, 22–29.
<http://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.10.001>
- Jia, Y., Du, Y., & Wu, J. (2015). Impacts of rainfall weather on urban traffic in Beijing: analysis and modeling. In *Transportation Research Board 94th Annual Meeting* (p. 14). 11-15 January, Washington DC, United States.
- Jones, E. R., & Goolsby, M. E. (1970). The environmental influence of rain on freeway capacity. *Highway Research Record*, (321), 74–82. Retrieved from <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=120839>
- Jovanović, N. (1990). *Planiranje saobraćaja*. Saobraćajni fakultet, Beograd.
- Jović, J. (1996). *Planiranje saobraćaja u gradovima:praktikum*. Saobraćajni fakultet, Beograd.
- Jović, J. (2007). Transportni model Beograda. Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd.
- Jović, J., Đorić, V., Čelar, N., Ivanović, I., Petrović, D., Kajalić, J., ... Vukanović, S. (2015). Ažuriranje transportnog modela Beograda sa saobraćajnim istraživanjima karakteristika kretanja. Institut Saobraćajnog fakulteta, Beograd.
- Kallenrode, M.-B. (2006). *Modeling Transport*. Osnabruck. Retrieved from <http://www.sotere.uni-osnabrueck.de/Lehre/skript/transport-master.pdf>
- Keay, K., & Simmonds, I. (2005). The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia. *Accident Analysis & Prevention*, 37(1), 109–124. <http://doi.org/10.1016/j.aap.2004.07.005>
- Khattak, A. J., & De Palma, A. (1997). The impact of adverse weather conditions on the propensity to change travel decisions: A survey of Brussels commuters. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 31(3), 181–203.
[http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564\(96\)00025-0](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564(96)00025-0)
- KHCM. (1992). *The Korean Highway Capacity Manual*. Korean Ministry of Construction.
- Kleitsch, K., & Cleveland, D. (1971). *The effect of rainfall on freeway capacity, Final report*. HRSI Report No TrS-6, Highway Research Board, National Cooperative

- Highway Research Program. Retrieved from
<https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/853/90154.0001.001.pdf;sequence=2>
- Knapp, K., & Smithson, L. (2001). Use of Mobile Video Data Collection Equipment to Investigate Winter Weather Vehicle Speeds. *Transportation Research Record*, 1745(1), 53–60. <http://doi.org/10.3141/1745-07>
- Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2007). Climate Change , Adverse Weather Conditions , and Transport: A Literature Survey, (September), 1–23.
- Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), 205–221.
<http://doi.org/10.1016/j.trd.2008.12.004>
- Kwon, T.-J., Fu, L., & Jiang, C. (2013). Effect of Winter Weather and Road Surface Conditions on Macroscopic Traffic Parameters. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2329, 54–62.
<http://doi.org/10.3141/2329-07>
- Kyte, M., Khatib, Z., Shannon, P., & Kitchener, F. (2001). Effect of Weather on Free-Flow Speed. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1776(1), 60–68. <http://doi.org/10.3141/1776-08>
- Lieu, H., & Ph, D. (2004). Benefit Assessment of Implementing Weather-Specific Signal Timing Plans Using Corsim. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1867, 202–209.
<http://doi.org/10.3141/1867-23>
- Lu, C., Zhao, F., & Hadi, M. (2010). A Travel Time Estimation Method for Planning Models Considering Signalized Intersections. *ICCTP Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, 1993–2000.
[http://doi.org/10.1061/41127\(382\)215](http://doi.org/10.1061/41127(382)215)
- Lyman, K., & Bertini, R. L. (2008). Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2046), 1–10.
<http://doi.org/10.3141/2046-01>
- Maki, P. (1999). Adverse weather traffic signal timing. In *Transportation Frontiers*

- for the Next Millennium: 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers (p. 8). 1-4 August, Las Vegas, Nevada. Retrieved from <http://trafficware.infopop.cc/downloads/00005.pdf>
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. <http://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Mashros, N., Ben-Edigbe, J., Hassan, S. A., Hassan, N. A., & Yunus, N. Z. M. (2014). Impact of rainfall condition on traffic flow and speed: A case study in Johor and Terengganu. *Jurnal Teknologi*, 70(4), 65–69. <http://doi.org/10.11113/jt.v70.3490>
- Maze, T. H., Agarwal, M., & Burchett, G. (2006). Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1948, 170–176. <http://doi.org/10.3141/1948-19>
- McBride, J. C., Kennedy, W. J., Thuet, J. H., Belangie, M. C., Stewart, R. M., Sy, C. C., & McConkie, F. R. (1977). *Economic Impact of Highway Snow and Ice Control*. (No. FHWA-RD-77-95 Final Rpt.).
- Milosavljević, M. (1990). *Meteorologija*. Beograd: Naučna knjiga, Beograd.
- Mosher, J., & Walter, W. (1963). A capacity restraint algorithm for assigning flow to a transport network. *Highway Research Board*, (6), 41–70. Retrieved from <https://trid.trb.org/request/120564>
- Moskowitz, K., & Newman, L. (1963). Notes on freeway capacity. *Highway Research Record*, (27), 44–68. Retrieved from <https://trid.trb.org/request/116539>
- Mtoi, E. T., & Moses, R. (2014). Calibration and Evaluation of Link Congestion Functions : Applying Intrinsic Sensitivity of Link Speed as a Practical Consideration to Heterogeneous Facility Types within Urban Network. *Journal of Transportation Technologies*, (4), 141–149. <http://doi.org/10.4236/jtts.2014.42014>
- Ortúzar, J. deD., & Willumsen, L. . (2011). *Modelling Transport* (4th ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Overgaard, K. R. (1967). Urban transportation planning: traffic estimation. *Traffic Quarterly*, 21(2), 197–218. Retrieved from

- <https://trid.trb.org/view.aspx?id=119965>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <http://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Peer, S., Koopmans, C., & Verhoef, E. T. (2012). Prediction of Travel Time Variability for Cost-Benefit Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(1), 79–90. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2011.09.016>
- Perrin, J., Martin, P. T., & Hansen, B. G. (2001). Modifying Signal Timing During Inclement Weather. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1748, 66–71. <http://doi.org/10.3141/1748-08>
- Petrović, D., Ivanović, I., & Djorić, V. (2015). Does Weather Impact on Commuters' Travel Demand - Empirical Case Study of Belgrade. In *European Transport Conference (ETC)* (pp. 1–11). 28-30 September, Frankfurt, Germany. Retrieved from <http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/4707/confid/20>
- Pisano, P. A., & Goodwin, L. C. (2004). Arterial Operations in Adverse Weather. In *ITE 2004 Annual Meeting and Exhibit* (p. 11). 1-4 August, Lake Buena Vista, Florida. Retrieved from www.ops.fhwa.dot.gov/weather/.../ite04_artopsadvewthr.doc
- Richardson, B. (1999). Toward a Policy on a Sustainable Transportation System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1670(99), 27–34. <http://doi.org/10.3141/1670-05>
- Ries, G. L. (1981). *Impact of weather on freeway capacity*. Minnesota Department of Transportation. Office of Traffic Engineering, Systems and Research Section.
- Rodrigue, J. P., Claude, C., & Brian, S. (2013). *The Geography of Transport Systems, 4th edition*. New York Routledge, Taylor&Francis Group.
- Shah, V. P., Stern, A. D., Goodwin, L., & Pisano, P. (2003). Analysis of Weather Impacts Flow in Metropolitan Washington D.C. In *Institute of Transportation Engineers 2003 Annual Meeting and Exhibit (held in conjunction with ITE District 6 Annual Meeting)* (p. 21). 24-28 August, Seattle, Washington. Retrieved from http://www.ops.fhwa.dot.gov/weather/best_practices/AMS2003_TrafficFlow

.pdf

- Sheffi, Y. (1985). *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- Shin, C.-H., & Choi, K. (1998). Saturation flow rate estimation under rainy weather conditions for on-line traffic control purpose. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2(3), 211–222. <http://doi.org/10.1007/BF02830476>
- Simićević, J. (2013). *Prilog definisanju politike parkiranja u zavisnosti od nivoa usluge na saobraćajnoj mreži*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet. Retrieved from <http://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/2671>
- Singh, R., & Dowling, R. (1999). Improved Speed-Flow Relationships: Application To Transportation Planning Models. In *7th TRB Conference on the Application of Transportation Planning Methods* (pp. 340–349). 7-11 March, Boston, Massachusetts. Retrieved from <http://docs.trb.org/00939750.pdf>
- Skabardonis, A., & Dowling, R. (1997). Improved speed-flow relationships for planning applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1572, 18–23. <http://doi.org/10.3141/1572-03>
- Smith, B. L., Byrne, K. G., Copperman, R. B., Hennessy, S. M., & Goodall, N. J. (2004). An Investigation into the Impact of Rainfall on Freeway Traffic Flow. In *Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*. 11-15 January, Washington DC, United States. Retrieved from http://people.virginia.edu/~njg2q/TRB_2004.pdf
- Smock, R. (1962). An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks. In *Highway Research Board Bulletin, 41st Annual Meeting of the Highway Research Board* (pp. 60–66). 8-12 January, Washington DC, United States.
- Soltman, T. J. (1966). Effects of alternate loading sequences on results from Chicago trip distribution and assignment model. *Highway Research Board*, (114), 122–140. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=120594>
- Spiess, H. (1990). Technical Note — Conical Volume-Delay Functions.

- Transportation Science*, 24(2), 153–158. <http://doi.org/10.1287/trsc.24.2.153>
- Stanić, B. (1991). *Istraživanja efekata signalnog plana pri zasićenom toku*.
Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.
- Steenbrink, P. A. (1974). *Optimisation of Transport Networks*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Stern, N. (2007). *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Suh, S., Park, C. H., & Kim, T. J. (1990). A highway capacity function in Korea: Measurement and calibration. *Transportation Research Part A: General*, 24(3), 177–186. [http://doi.org/10.1016/0191-2607\(90\)90055-B](http://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90055-B)
- Sun, H., Yang, J., Wang, L., Li, L., & Wu, B. (2013). Saturation Flow Rate and Start-up Lost Time of Dual-left Lanes at Signalized Intersection in Rainy Weather Condition. In *Proceedings from the 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP2013)* (Vol. 96, pp. 270–279). 6 November, Shenzhen, China. <http://doi.org/doi:10.1016/j.sbspro.2013.08.034>
- Tanner, J. C. (1952). Effect of Weather on Traffic Flow. *Nature*, 169(107). <http://doi.org/doi:10.1038/169107a0>
- Tisato, P. (1991). Suggestions for an improved Davidson travel time function. *Australian Road Research*, 21(2), 85–100. Retrieved from <http://arrbknowledge.com>
- TMIP. (2014). Transportation Model Improvement Program (TMIP). Retrieved from <http://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/>
- Transport for London. (2010). Traffic Modelling Guidelines TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice. Transport for London. Retrieved from <http://tfl.gov.uk/streetspublication>
- Tsapakis, I., Cheng, T., & Bolbol, A. (2013). Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times. *Journal of Transport Geography*, 28, 204–211. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.11.003>
- Tu, H., van Lint, H. W. C., & van Zuylen, H. J. (2007). Impact of Adverse Weather on Travel Time Variability of Freeway Corridors. In *Transportation Research Board 86th Annual Meeting* (p. 15). 21-25 January, Washington DC, United States.

- Turner, J., & Harahap, G. (1993). Simplified saturation flow data collection methods. In *CODATU VI Conference on the Development and Planning of Urban Transport* (pp. 65–76). 15-19 February, Tunis. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.2312&rep=rep1&type=pdf>
- Turner, S., Eisele, W., Benz, R., & Douglas, H. (1998). *Travel time data collection handbook. Report FHWA-PL-98-035, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.*
- United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC. (2006). Handbook. Bonn, Germany.
- Unkašević, M. (1994). *Klima Beograda*. Naučna knjiga, Beograd.
- Unrau, D., & Andrey, J. (2006). Driver response to rainfall on urban expressways. *Transportation Research Record, 1980*(6), 24–30. <http://doi.org/10.3141/1980-06>
- Van Berkum, E., Weijermars, W., & Hagens, A. (2006). The impact of weather on urban travel demand in the Netherlands. In *In Proceedings of the EWGT2006 International Joint Conferences* (pp. 245–252).
- Van Stralen, W., Calvert, S. ., & Molin, E. J. E. (2015). The influence of adverse weather conditions on the probability of congestion on Dutch motorways. *European Journal of Transport & Infrastructure Research, 15*(4), 482–500. Retrieved from <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:e6e06e3a-3996-413f-a104-cc01cca9e324?collection=research>
- Vukanović, S. (1997). *Saobraćajne mreže*. Saobraćajni fakultet, Beograd.
- Wang, L., Yamamoto, T., Miwa, T., & Morikawa, T. (2006). An Analysis of Effects of Rainfall on Travel Speed at Signalized Surface Road Network Based on Probe Vehicle Data. In *Proceedings of the Conference on Traffic and Transportation Studies, ICTTS* (pp. 615–624). 2-4 August, Xi'an, China.
- Wardrop, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. In *Proceedings of Institution of Civil Engineeris* (pp. 325–362). 24 January, London, United Kingdom. <http://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11259>
- Wardrop, J. G. (1968). Journey speed and flow in central urban areas. *Traffic Engineering & Control, 8*(8), 528–532.

- Webster, F. V. (1958). *Traffic signal settings*. London : H.M.S.O.
- Webster, F. V, & Cobbe, B. M. (1966). *Traffic Signals*. London : H.M.S.O.
- Xie, C., Cheu, R. L., & Lee, D. (2001). Calibration-Free Arterial Link Speed Estimation Model Using Loop Data. *Journal of Transportation Engineering*, 127(6), 507–514. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2001\)127:6\(507\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:6(507))
- Xu, F., He, Z., Sha, Z., Zhuang, L., & Sun, W. (2013). Assessing the Impact of Rainfall on Traffic Operation of Urban Road Network. In *Proceedings from the 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP2013)* (Vol. 96, pp. 82–89). 6 November, Shenzhen, China. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.012>
- Yazici, M. A., Kamga, C., & Singhal, A. (2013). Weather's Impact on Travel Time and Travel Time Variability in New York City. In *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting* (p. 18). 13-17 January, Washington DC, United States. Retrieved from www.researchgate.net/publication/255982535
- Zhang, L., Holm, P., & Colyar, J. (2004). *Identifying and assessing key weather-related parameters and their impacts on traffic operations using simulation*. Report FHWA-HRT-04-131, Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.
- Zhen, D. (2007). *A Static Traffic Assignment Model Combined with an Artificial Neural Network Delay Model*. Doctoral Dissertations. Florida International University, Miami, Florida. Retrieved from <http://digitalcommons.fiu.edu/etd>

PRILOG I Osnovne metode opterećenja ulične mreže

U okviru ovog priloga predstavljeni su samo osnovni metodološki pristupi procedura raspodele opterećenja ulične mreže, bez ulaženja u detaljnost i varijacije konkretnih modela.

“Sve ili ništa” predstavlja jedan od najjednostavnijih metoda opterećenja ulične mreže. Može se svrstati u grupu neravnotežnih modela. Podrazumeva da svi korisnici biraju trasu od izvorne do ciljne tačke kretanja sa najmanjim otporom (vreme putovanja ili distanca). Ova metoda ne uzima u obzir kapacitet, niti se podrazumeva da se vreme putovanja na izabranoj trasi menja usled povećanja protoka saobraćaja na izabranoj trasi. Ne uzima se u obzir ponašanje korisnika i ne preporučuje se za modeliranje ulične mreže u periodima intenzivnih transportnih zahteva (u vršnim satima). Ova metoda je upotrebljiva pri ispitivanjima globalnog razvoja saobraćajne mreže i generisanja osnovnih koridora po pitanju kapaciteta. (Vukanović, 1997). U planerskom smislu ima vrlo ograničenu primenu. Međutim, važno je istaći da veliki broj modela raspodele saobraćaja na uličnoj mreži u određenim segmentima algoritma koristi logiku ove metodu.

Ekvilibrijum metoda je bazirana na Wardrop-ovim principima o kojima je bilo više reči u prethodnim poglavljima. U iterativnoj proceduri vrši se opterećivanje alternativnih trasa, uzimajući u obzir promenu vremena putovanja u odnosu na iskorišćenje kapaciteta. Iteracije se ponavljaju do momenta uspostavljanja ravnoteže u vremenima putovanja na alternativnim trasama. Metoda je bazirana na pretpostavkama da:

- korisnik precizno poznaje otpore putovanja na trasi,
- je vreme putovanja na linku samo u funkciji protoka saobraćaja na tom linku,
- je funkcija vremena putovanja pozitivna i rastuća (kako raste protok saobraćaja raste i vreme putovanja).

Matematička formulacija korisničkog ekvilibrijuma baziranog na prvom Wardrop-ovom principu (Sheffi, 1985):

$$\begin{aligned} \text{Minimizirati } Z &= \sum_a \int_0^{x_a} t_a(x_a) dx && k - \text{trasa,} \\ \sum_k f_k^{rs} &= q_{rs} : \forall r, s && x_a - \text{uravnoteženi tokovi na linku } a, \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} : \forall a && t_a - \text{vreme putovanja na linku } a, \\ f_k^{rs} &\geq 0 : \forall k, r, s && f_k^{rs} - \text{tok na trasi } k \text{ koja povezuje I-C par } r-s, \\ &&& q_{rs} - \text{ukupan broj putovanja između čvora } r \text{ i čvora } s, \\ &&& \delta_{a,k}^{rs} \text{ je po definiciji ograničenje i dobija se:} \\ &&& \delta_{a,k}^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{ukoliko link pripada trasi } k \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases} \end{aligned}$$

Kada je reč o sistemskom ekvilibrijumu, baziranom na drugom Wardrop-ovom principu, cilj je minimizacija ukupnog vremena putovanja u sistemu. Ne modelira se realno ponašanje korisnika i u planerskoj praksi se primenjuje kada je reč o optimizaciji "troškova" putovanja na makro nivou.

Matematička formulacija sistemskog ekvilibrijuma (Sheffi, 1985):

$$\begin{aligned} \text{Minimizirati } Z &= \sum_a x_a t_a(x_a) && x_a - \text{uravnoteženi tokovi na linku } a, \\ \sum_k f_k^{rs} &= q_{rs} : \forall r, s && t_a - \text{vreme putovanja na linku } a, \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} : \forall a && f_k^{rs} - \text{tok na trasi } k \text{ koja povezuje I-C par } r-s, \\ f_k^{rs} &\geq 0 : \forall k, r, s && q_{rs} - \text{ukupan broj putovanja između čvora } r \text{ i čvora } s \\ x_a &\geq 0 : a \in A \end{aligned}$$

Stohastičkim metodama pokušava se uzeti u obzir varijabilnost u transportnim troškovima, koja prouzrokuje i donošenje različitih odluka. Deterministički modeli, kako je rečeno u prethodnom tekstu, podrazumevaju da se odluka o izboru trase donosi uvek na isti način. Stohastičke metode su bazirane na pretpostavkama da:

- ne postoji jedinstveni kriterijum izbora putanje, iako je vreme putovanja najčešće birani kriterijum
- korisnici u odnosu na postavljene kriterijume različito procenjuju jednu istu putanju

PRILOG II Funkcije vremena putovanja

Branston je u svom radu koji je objavljen 1975. godine dao pregled funkcija vremena putovanja koje su do tada bile korišćene (Branston, 1976). Iako je rad pisan pre oko četrdeset godina, neke od predstavljenih funkcija se i danas koriste u modeliranju opterećenja ulične mreže. Zato je u prvom delu ovog priloga u kratkim crtama predstavljen razvoj funkcija vremena putovanja baziran na pomenutom radu.

Branston je funkcije, u zavisnosti od pristupa prilikom definisanja, podelio u dve kategorije. Prvi pristup je baziran na formiranju matematičkih funkcija zavisnosti na osnovu prikupljenih podataka. Uglavnom je reč o definisanju relativno jednostavnih veza između vremena putovanja i protoka saobraćaja. Nedostatak kod ovog pristupa je što funkcija ne može jednostavno da se prilagodi promenama vezanim za karakteristike deonice, osim kroz promene pojedinih koeficijenata funkcije. Kod ovako kreiranih funkcija veoma je teško uspostaviti vezu između karakteristika deonice i koeficijenata u funkciji. Drugi pristup se u većoj meri oslanja na utvrđenoj teorijskoj zavisnosti osnovnih parametara saobraćajnog toka. Nedostatak ovog pristupa ogleda se u uspostavljanju relativno složenih funkcionalnih zavisnosti između vremena putovanja i protoka saobraćaja. Ovaj pristup zahteva i više informacija o karakteristikama saobraćajne mreže, kao što su signalni planovi i tehničke karakteristike deonice. Osnovna prednost funkcija, definisanih na ovaj način, je ta što se veoma lako prilagođavaju promenama u karakteristikama ulične mreže.

U pogledu opsega iskorišćenja kapaciteta (veliçine odnosa q/c), FVP treba što realnije da opisuje promenu vremena putovanja za vrednosti promene protoka saobraćaja koje ne prelaze kapacitet saobraćajnice. Ipak, u pojedinim procedurama raspodele saobraćajnog opterećenja, u okviru kojih se procedura opterećenja realizuje u više iteracija, u prvim iteracijama može doći do opterećenja određenih deonica preko granice kapaciteta. U tom slučaju, vreme putovanja na tim deonicama zavisi od definisanog odnosa vremena putovanja i vrednosti protoka saobraćaja koji prevazilazi kapacitet ($q/c > 1$). Veoma je značajno da i u ovom opsegu

FVP bude realno definisana kako bi omogućila logičnu preraspodelu saobraćaja na alternativne rute u narednim iteracijama. Zbog toga se FVP formiraju i za vrednosti protoka koje su veće od kapaciteta. Treba imati u vidu da deo funkcije koji je definisan za vrednosti veće od kapaciteta nema realno značenje, već služi samo da bi se uspostavio balans između protoka i kapaciteta u fazi raspodele opterećenja na uličnoj mreži.

Funkcije vremena putovanja bazirane na matematičkom pristupu

Jedna od prvih funkcija zavisnosti vremena putovanja i protoka saobraćaja koje su korišćene u procedurama opterećenja ulične mreže predstavljena je u istraživanjima iz 1961. godine. Saobraćajna istraživanja su sprovedena u Torontu, a saobraćajnice su kategorisane u odnosu na broj raskrsnica po kilometru i na osnovu ograničenja brzine. Ovaj model je baziran na dve linearne prave koje opisuju ovu zavisnost (Irwin, Dodd, & Von Cube, 1961):

$$\begin{array}{ll} t = t_a + \alpha(q - C'_o) & \text{za } q < C'_o \\ t = t_a + \beta(q - C'_o) & \text{za } q \geq C'_o \end{array} \quad \text{gde je:} \quad t_a = t_0 + \alpha C'_o$$

q – saobraćajni protok

t – vreme putovanja na deonici pri određenoj vrednosti protoka saobraćaja q

t_0 – vreme putovanja u uslovima slobodnog toka

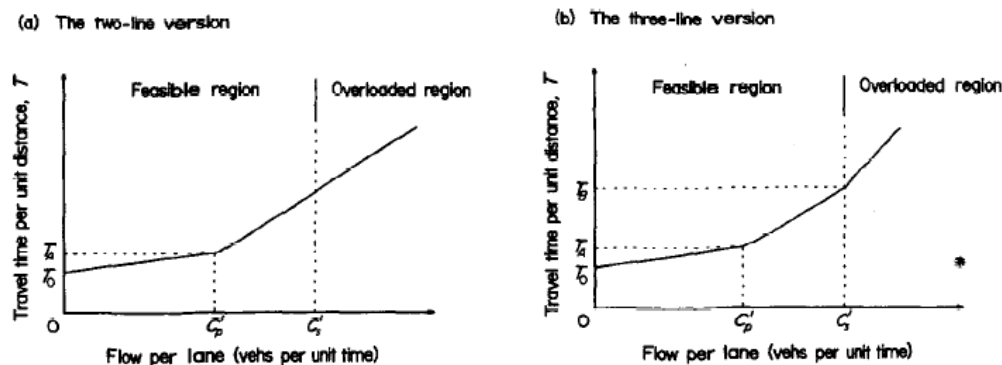
C_0 – operativni kapacitet deonice

C – bazni kapacitet deonice

$\alpha, \beta, \gamma, \delta \dots$ – koeficijenti funkcije vremena putovanja

q' i C' – vrednosti protoka saobraćaja i kapaciteta merenih na nivou saobraćajne trake

Iz modela se vidi da je formulisan posebno za dva različita stanja, nezasićeno i zasićeno stanje saobraćajnog toka. Za vrednost operativnog kapaciteta usvojena je vrednost kapaciteta pri kojoj u daljem povećanju protoka saobraćaja vreme putovanja počinje intenzivnije da raste (Slika 24a)



Slika 24 FVP sa dve (a) i tri linearne prave (b) (Branston, 1976)

Ova funkcija je 1962. godine od strane iste grupe autora proširena za oblast u kojoj saobraćajni protok prelazi vrednost baznog kapaciteta, tako da su u ovom slučaju definisane funkcije za tri linearne prave (Slika 24b):

$$\begin{array}{lll}
 t = t_a + \alpha(q - C'_0) & \text{za} & q < C'_0 \\
 t = t_a + \beta(q - C'_0) & \text{za} & C'_0 \leq q \leq C' \\
 t = t_b + \gamma(q - C') & \text{za} & q > C'
 \end{array}
 \quad \text{gde je:}
 \quad
 \begin{array}{l}
 t_a = t_0 + \alpha C'_0 \\
 t_b = t_a + \beta(C' - C'_0)
 \end{array}$$

Na osnovu oba modela može se zaključiti da je reč o relativno jednostavnim funkcijama baziranim na linearnim zavisnostima. Na ovaj način je omogućena jednostavna implementacija ove funkcije u modele saobraćajnog opterećenja. Otežavajuću okolnost kod prezentovanih modela, predstavlja definisanje tačke operativnog kapaciteta, posebno kada ne postoji odgovarajuća baza snimljenih podataka. To može da prouzrokuje teškoće u definisanju linearne veze između posmatranih veličina i karakteristika deonice. Navedeni nedostaci su doveli do zaključka da je za opisivanje funkcionalne zavisnosti vremena putovanja i protoka saobraćaja pogodnija krivolinijska funkcija bez diskontinuiteta pri vrednosti praktičnog kapacitetu.

Jedan od najranijih oblika krivolinijske funkcionalne zavisnosti vremena putovanja i protoka saobraćaja prikazao je Smock (1962) na osnovu istraživanja sprovedenih u Mičigenu. Formulacija modela je glasila (Smock, 1962):

$$t = t_0 e^{\left(\frac{q}{C}\right)}$$

Vrednost kapaciteta C za svaku analiziranu deonicu definisana je kao prosečna vrednost kapaciteta raskrsnica koje su se nalazile na krajevima deonica. Iako ovakav metodološki pristup sadrži nedostatke, autor je smatrao da je takva vrsta aproksimacije dovoljno dobra za praktičnu primenu. Testiranje funkcije je pokazalo da na dosta manjem broju deonica protok saobraćaja prevazilazi vrednost kapaciteta saobraćajnice, za razliku od do tada korišćenog modela opterećenja ulične mreže „sve ili ništa“.

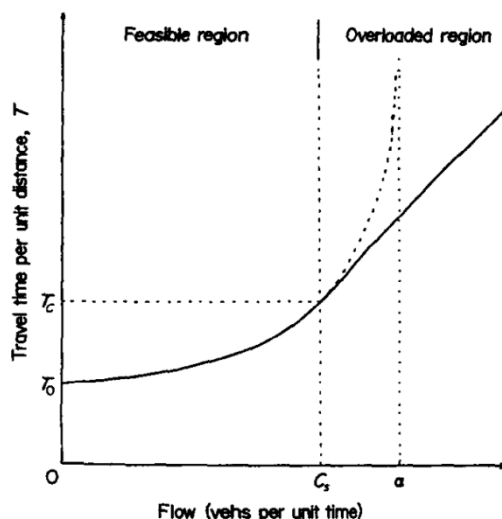
Mosher 1963. godine predlaže dve funkcije vremena putovanja, logaritamsku i hiperboličnu funkciju (Mosher & Walter, 1963). Osnovna pretpostavka na kojoj su bazirani modeli, je da ista promena vrednosti protoka ne rezultuje identičnom promenom vremena putovanja pri nezasićenom i zasićenom saobraćajnom toku.

$$\text{Logaritamska FVP} \quad t = t_0 + \ln(\alpha) - \ln(\alpha - q) \quad \text{za} \quad q \leq \alpha$$

$$\text{Hiperbolična FVP} \quad t = \beta - \frac{\alpha(t_0 - \beta)}{q - \alpha} \quad \text{za} \quad q \leq \alpha$$

U formulacijama oba modela, koeficijent α je definisan kao vrednost zasićenog saobraćajnog toka. U predloženim modelima pri zasićenom saobraćajnom toku vreme putovanja postaje beskonačno. Ipak, na realnoj saobraćajnoj mreži jasno je da će vreme putovanja imati neku konačnu vrednost, osim u ekstremnim situacijama. Zbog toga, vrednost baznog kapaciteta mora uvek biti manja od α . Međutim, i u slučaju da je α veća od vrednosti baznog kapaciteta, u iterativnim procedurama opterećenja može doći do prekoračenja obe vrednosti. U tom slučaju, vreme putovanja na toj deonici opet postaje beskonačno. Iz tog razloga ove FVP nisu preporučljive kada je reč o iterativnim modelima saobraćajnog opterećenja. Postavljanjem ograničenja FVP, ovaj problem se donekle može pravazići. Prognozirani tokovi na mreži se mogu ograničiti za vrednosti $0 \leq q \leq C$. Na ovaj način, za zagušene deonice vreme putovanja će biti veliko, ali neće biti beskonačno. Na osnovu ovih zaključaka Mosher je predstavio i modifikaciju predstavljenih FVP (Slika 25):

Modifikovana logaritamska FVP	$t = t_0 + \beta \ln(\alpha) - \beta \ln(\alpha - q)$ $t = t_c + sq$	za $q \leq C$ za $q > C$ gde je: $t_c = t_0 + \beta \ln(\alpha) - \beta \ln(\alpha - C)$ $s = \beta / (\alpha - C)$ $\alpha > C$
Modifikovana hiperbolična FVP	$t = \beta - \frac{\alpha(t_0 - \beta)}{q - \alpha}$ $t = t_c + sq$	za $q \leq C$ za $q > C$ gde je: $t_c = \beta - \frac{\alpha(t_0 - \beta)}{C - \alpha}$ $s = \alpha(t_0 - \beta) / (C - \alpha)^2$ $\alpha > C, \quad t_0 > \beta$



Slika 25 Modifikovana FVP (Branston, 1976)

Sličan oblik funkcionalne zavisnosti koju je definisao Smock, predstavio je i Soltman 1966. godine (Soltman, 1966).

$$t = t_0 2^{(q/C_0)} \quad \text{za vrednost:} \quad q/C_0 \leq 2$$

Soltman nije eksplicitno naveo da li je reč o operativnom ili osnovnom kapacitetu, ali se na osnovu datog ograničenja sa većom verovatnoćom može pretpostaviti da je reč o operativnom kapacitetu. Rezultati validacije ove funkcije nisu objavljeni. Overgaard je 1967. godine generalizovao prethodno pomenuti model (Overgaard, 1967).

$$t = t_0 \alpha^{(q/c_0)^\beta}$$

U predstavljenoj funkciji, koeficijentom α je regulisan odnos promene vremena putovanja u odnosu promenu protoka saobraćaja do nivoa operativnog kapaciteta. Soltman je koeficijentu α dodelio vrednost $\alpha = 2$, dok je Smock koeficijentu α dodelio vrednost $\alpha = e$, osnovu prirodnog algoritma. Overgaard je razvio osam setova vrednosti za C_0 , T_0 , α i β u kojima je vrednost koeficijenta varira između 1 i 1.7. Jedan od osnovnih nedostataka ove funkcije je njena integrabilnost. Kod algoritama saobraćajnog opterećenja, koji su bazirani na prvom Wardrop-ovom principu, zahteva se da funkcija vremena putovanja bude jednostavno integrabilna, odnosno da postoji konačna vrednost za integral funkcije. Upravo taj nedostatak je onemogućio širu primenu ove FVP.

Jedna od najčešće korišćenih FVP predstavljena je 1964. godine od strane FHWA (Federal Highway Administration) i poznata je kao BPR funkcija (Bureau of Public Roads, 1964).

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{q}{C_0} \right)^\beta \right)$$

Podrazumevane vrednosti koeficijenata iznosile su $\alpha = 4$ i $\beta = 0.15$. Koeficijent α je vezan za definisanje tačke u kojoj vreme putovanja počinje da raste u odnosu na vreme putovanja pri slobodnom toku. Koeficijentom β je određena brzina promene vremena putovanja u odnosu na porast koeficijenta iskorišćenja kapaciteta. Interesantno je da nikad nije predstavljena baza podataka na osnovu koje se došlo do formulacije ove funkcije i definisanih vrednosti koeficijenata. Jednostavnost matematičke formulacije i mali broj ulaznih podataka doprineo je da BPR funkcija postane jedna od najčešće korišćenih FVP. BPR funkcija je prvenstveno razvijena za neprekinute saobraćajne tokove, odnosno vangradsku putnu mrežu. Ukoliko se ova funkcija primeni na gradsku uličnu mrežu, sa blisko pozicioniranim signalisanim raskrsnicama, vremenskim gubicima na raskrsnicama smanjuje se vrednost kapaciteta sa bazne na operativnu vrednost.

Steenbrink je 1974. godine predložio modifikaciju BPR funkcije, zamenom vrednosti operativnog kapaciteta sa baznom vrednošću kapaciteta (Steenbrink, 1974). Prednost ovako formulisane funkcije predstavlja lakša mogućnost utvrđivanja bazne vrednosti kapaciteta. Steenbrink je raspolagao delom baze podataka za male vrednosti odnosa q/C . Nedostatak dela baze podataka za visoke vrednosti odnosa q/C prevaziđen je tako što su podaci generisani na osnovu eksperatskih iskustava. Kriva koja opisuje funkciju je aproksimirana na osnovu postojećih i generisanih tačaka, metodom najmanjih kvadrata. Predloženo je da se za koeficijent β uzme vrednost $\beta = 5$. S obzirom da je u funkciji korišćena bazna a ne operativna vrednost kapaciteta, predložena vrednost koeficijenta α se takođe razlikovala od podrazumevane u BPR funkciji i iznosila je $\alpha = 2.62$. Steenbrink je predložio da se navedena funkcija i vrednosti koeficijenata koriste za sve kategorije saobraćajnica. Rezultati implementacije ove funkcije vremena putovanja na realnoj saobraćajnoj mreži nisu publikovani.

Postoji veliki broj istraživanja u kojima su ekperimentalno utvrđene drugačije vrednosti parametara α i β , što ide u prilog navedenoj konstataciji da se funkcionalne zavisnosti definisane funkcijom vremena putovanja, razlikuju u zavisnosti od karakteristika saobraćajne mreže i područja istraživanja.

Kanadska agencija za saobraćajna istraživanja 1966. godine je predstavila funkciju vremena putovanja dobijenu na osnovu istraživanja u gradu Winipegu.

$$t = \alpha + \beta(q' - \gamma) + \sqrt{(\beta^2(q' - \gamma)^2 + \delta)}$$

Iz funkcije se vidi da je protok saobraćaja meren u jednoj saobraćajnoj traci. Iako su 1975. godine Florian i Nguyen koristeći datu funkciju vremena putovanja dobili veoma dobra poklapanja između prognoziranih i stvarnih vrednosti vremena putovanja na saobraćajnoj mreži Winipega, postavilo se pitanje opšte upotrebljivosti ove funkcije (Florian & Nguyen, 1976). Osnovni nedostatak predstavljao je veliki broj parametara i nedovoljno jasna veza između parametara funkcije i karakteristika saobraćajnice. Testiranja u praksi su pokazala da se na istoj bazi podataka, korišćenjem nekih od jednostavnijih FVP kao što su

Overgardova i BPR, dobijaju veoma slični rezultati sa rezultatima primene navedene funkcije.

Teorijski pristup u formiranju funkcija vremena putovanja

U teorijskom pristupu, za utvrđivanje FVP, vreme putovanja duž deonice pri bilo kojoj vrednosti iskorišćenja kapaciteta, posmatra se odnos sume prosečnog vremena putovanja posmatranom deonicom i prosečnog vremena koje vozilo provede u redu na raskrsnici pri toj vrednosti iskorišćenja kapaciteta (Branston, 1976):

$$t = \frac{t_p + t_r}{L} = \frac{1}{V_p} + \frac{t_r}{L}$$

t_p – vreme putovanja vozila u kretanju

t_r – vreme provedeno u redu na raskrsnici

L – dužina deonice

V_p – brzina kretanja vozila

Kroz saobraćajnu studiju Čikaga 1959. godine razvijene su serije FVP u odnosu na iskorišćenje kapaciteta na signalisanim gradskim arterijama (Campbell, Keefer, & Adams, 1959). Autori su promovisali metodu koja uključuje akumulativna vremena zaustavljenog vozila na raskrsnici u računanje ukupnog vremena putovanja kroz posmatranu deonicu. Akumulativno vreme zaustavljenog vozila na raskrsnici se, za sve vrednosti protoka saobraćaja, računalo kao srednja vrednost „maksimalnog“ i „minimalnog“ mogućeg vremena zaustavljenog vozila na raskrsnici. U okviru studije je pokazano da se dolazak vozila na signalisanu gradsku raskrsnicu može opisati Poasonovom raspodelom ukoliko su intervali uzorkovanja slični sa intervalima trajanja ciklusa. Prosečna brzina se računala za različite vrednosti kapaciteta raskrsnica i različite vrednosti protoka saobraćaja. Krive, koje opisuju FVP, su aproksimirane kroz dva linearna segmenta, a tačka diskontinuiteta je definisana na odnosu $q/C=60\%$. Dobijeni oblici zavisnosti su imali sledeću matematičku formulaciju:

$$t = t_0 \quad \text{za} \quad \frac{q}{C} \leq 0.6$$

$$t = t_0 + \alpha\left(\frac{q}{C} - 0.6\right) \quad \text{za} \quad \frac{q}{C} > 0.6$$

Wardrop je 1968. godine na primeru saobraćajne mreže centralnog Londona prikazao postupak uspostavljanja relacije između brzine i protoka (Wardrop, 1968). Wardrop-ova prvobitna FVP je bazirana na nivou ulične mreže.

$$t = \frac{1}{V_p} + nt_r = \frac{1}{\min\{V_0, \beta(1 - \gamma q)\}} + \frac{n\alpha}{\left(1 - \frac{q}{\lambda S}\right)}$$
$$\gamma < \frac{1}{\lambda S}$$

- n – broj signalisanih raskrsnica po jedinici dužine
- t_r – vreme provedeno u redu na signalisanoj raskrsnici
- V_p – brzina kretanja vozila
- V_0 – brzina slobodnog toka
- S – vrednost zasićenog saobraćajnog toka
- λ – učešće trajanja zelenog signalnog pojma u ciklusu
- α, β, γ – koeficijenti

Wardrop je formulisao funkciju tako da opisuje odnose između prosečnih vremenskih gubitaka i protoka saobraćaja za fiksni režim rada signala i za adaptibilni režim rada signala. Za oba tipa rada signala je pokazao da relacija između prosečnih vremenskih gubitaka i protoka saobraćaja može da se opiše kao linearna. U cilju pojednostavljanja modela, pretpostavljeno je da brzina linearno opada sa porastom protoka saobraćaja. Transformacijom funkcije sa nivoa ulične mreže na nivo deonice dobijen je konačan oblik FVP.

$$t = \frac{t_0}{(1 - \gamma q)} + \frac{\alpha\beta}{(\alpha - q)L}$$

uz kriterijume da je $\alpha > C$ i $\gamma < 1/C$

Korišćenje ovog oblika funkcije vremena putovanja je u iterativnim procedurama modeliranja saobraćajnog opterećenja ograničeno na $0 \leq q \leq C$. Ograničenje je uvedeno iz razloga što bi pojava protoka saobraćaja većeg od α u početnim iteracijama, dovela do toga da vrednost vremena putovanja bude manja od vremena putovanja u uslovima slobodnom toku, što nije realno.

Iako je razvoj i rad na istraživanjima optimalnih formulacija FVP počeo pre oko više od 50 godina i danas su istraživanja na ovu temu aktuelna. Pored navedenih FVP biće predstavljeno još nekoliko veoma značajnih formulacija FVP.

Davidsonova funkcija vremena putovanja

Davidsonova funkcija vremena putovanja za potrebe planiranja saobraćaja je predstavljena 1966. godine. Vremenom je dosta puta modifikovana i unapređivana. Izvorni oblik Davidsonove funkcije dobijen je izučavanjem teorije redova na raskrsnici (Davidson, 1966):

$$t = t_0 \left[1 + \frac{J_D x}{1 - x} \right]$$

t – prosečno vreme putovanja

t_0 – vreme putovanja pri slobodnom toku

J_D – koeficijent vremenskog gubitka (ili $1 - J_D$ koeficijent kvaliteta usluge)

x – koeficijent iskorišćenja kapaciteta q/C

q – protok saobraćaja

C – kapacitet

Koeficijent gubitaka J_D uzima u obzir učestalost pojave elemenata koji prouzrokuju gubitke u vremenu putovanja (na primer, signalisane raskrsnice). Pretpostavka je da J_D varira zavisno od karakteristika rute i prostorne lokacije analizirane saobraćajnice na području grada. Kako bi približavanjem protoka saobraćaja kapacitetu, vreme putovanja težilo beskonačnosti Davidson je tvrdio da funkcija vremena putovanja treba da bude takva da ograniči protok saobraćaja na vrednosti ispod kapaciteta.

Boyce (1981) je ispitivao parametar J_D poredeći krivu Davidsonove funkcije vremena putovanja sa zakonitostima promene vremena putovanja u odnosu na koeficijente iskorišćenja predstavljene u priručniku HCM iz 1965. godine, za autoputske i gradske deonice (Boyce, Janson, & Eash, 1981). Uprkos različitim karakteristikama deonica, u oba slučaja su dobijene slične vrednosti za parametar J_D . Važno je napomenuti da parametar J_D nije nezavistan u odnosu na zasićeni

saobraćajni tok (kapacitet) i vreme putovanja pri brzini slobodnog toka. Vrednost parametra J_D opada kako vreme putovanja u uslovima slobodnog toka raste.

Nemogućnost korišćenja Davidsonove funkcije vremena putovanja za vrednosti protoka saobraćaja koje prevazilaze kapacitet u iterativnim procedurama saobraćajnog opterećenja, prouzrokovalo je potrebu za modifikacijom FVP. Modifikovana Davidsonova funkcija vremena putovanja imala je sledeći oblik (Tisato, 1991):

$$t = t_0 \left[1 + \frac{J_D x}{1 - x} \right] \quad \text{za} \quad x \leq \mu$$
$$t = t_0 \left[1 + \frac{J_D \mu}{1 - \mu} + \frac{J(x - \mu)}{(1 - \mu)^2} \right] \quad \text{za} \quad x > \mu$$

Parametar μ određuje korisnik funkcije i obično se vrednosti kreću od 0.85 do 0.95. Modifikovanom funkcijom su obezbeđene konačne vrednosti vremena putovanja za sve varijacije koeficijenta iskorišćenja kapaciteta.

Akčelikova funkcija vremena putovanja

Akčelik je 1991. godine predložio novi, vremenski zavisni, oblik Davidsonove funkcije koristeći tehniku transformacije koordinata, kojim je pokušao da obuhvati i vremenske gubitke na raskrsnici (Akcelik, 1991). Za razliku od Davidsonove funkcije primena Akčelikove funkcije je proširena i na vrednosti koeficijenta iskorišćenja kapaciteta koje su veće od 1.

$$t = t_0 \left\{ 1 + 0.25r_f \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8J_D x}{C t_0 r_f}} \right] \right\}$$

t_0 – vreme putovanja u uslovima slobodnog toka

$r_f = T_f/t_0$ odnos perioda posmatranja i vremena putovanja u uslovima slobodnog toka

x – koeficijent iskorišćenja kapaciteta (stepen zasićenja)

J_D – koeficijent vremenskih gubitaka

C – kapacitet

FVP je formirana tako da u okviru procene ukupnog vremena putovanja, obuhvati i vreme kretanja vozila i vremenske gubitke na raskrsnici. Posebno je istaknuto da

značajno učešće u ukupnom vremenu putovanja imaju vremenski gubici na raskrsnici. Koeficijent vremenskih gubitaka je u korelaciji sa brojem signalisanih raskrsnica po dužini analizirane trase.

$$J_D = k \cdot p$$

p – broj signalisanih raskrsnica po dužini analizirane trase

k – koeficijent (za izolovane signalisane raskrsnice $k = 0.6$, za raskrsnice u koordinaciji $k = 0.3$, za kružne i nesignalisane raskrsnice $k = 1$)

U skladu sa tim, može se zaključiti da za autoputske deonice i koordinisane pravce vrednost J_D uzima manju vrednost u odnosu na pravce bez koordinacije signala. Takođe, koeficijent vremenskih gubitaka se može proračunati i ukoliko je poznata vrednost vremena putovanja pri kapacitetu ($x = 1$).

$$t_m = t_0 + \sqrt{\frac{0,5J_A}{C}}$$

t_m – vreme putovanja pri kapacitetu

Akčelik je u svom radu predstavio i vrednosti parametra za različite kategorije saobraćajnica (Tabela 82)

Tabela 82 Vrednosti parametra J_D za različite kategorije saobraćajnica (Akčelik, 1991)

Kategorija saobraćajnice	Brzina slobodnog toka (km/h)	Kapacitet po traci voz/čas/traci	J_D	t_m/t_0
Autoput	120	2000	0.1	1.587
Magistrala (neprekinuti tok)	100	1800	0.2	1.754
Gradska magistrala (prekinuti tok)	80	1200	0.4	2.041
Saobraćajnica prvog reda (prekinuti tok)	60	909	0.8	2.272
Saobraćajnica drugog reda (prekinuti tok)	40	600	1.6	2.439

Singh (1999) je istakao da Akčelikova funkcija vremena putovanja poseduje i dodatne kvalitete koji su vezani za bolju konvergenciju i mnogo realniju procenu brzine u uslovima zagušenja (Singh & Dowling, 1999). Još jedan od kvaliteta Akčelikove funkcije vremena putovanja je njena konciznost, jer je reč o funkcionalnoj formi širokog spektra upotrebe pri čemu je izbegnuta primena složenih parametara vremenskih gubitaka na raskrsnici (Mtoi & Moses, 2014).

Konusna funkcija vremena putovanja

Spiess je u radu objavljenom 1990. godine predložio Konusnu funkciju vremena putovanja kao rešenje za prevazilaženje nedostataka koji su uočeni kod BPR funkcije (Spiess, 1990).

Nedostaci BPR funkcije uočeni od strane Spiess-a, posebno kada je reč o primeni visokih vrednosti za koeficijent β su:

1. Za realno opterećenje saobraćajne mreže pretpostavka je da se odnos q/C može kretati od 0 do 1 (ili vrlo malo preko 1). Kada je reč o ekvilibrijumu, kao jednom od najčešće korišćenih modela raspodele saobraćajnog opterećenja, u prvih nekoliko iteracija to nije slučaj. Vrednost q/c može dostići i veće vrednosti kao što su 3, 5 ili čak i više. Na primer, to znači da za $\beta=12$ i odnos $q/c=3$ vreme putovanja bi se u odnosu na vreme putovanja u uslovima slobodnog toka povećalo 531442 puta. Ovakvi rezultati otežavaju konvergenciju ekvilibrijumu dajući neopravdano velike težine preopterećenim deonicama, a takođe mogu prouzrokovati i numeričke probleme u smislu gubitka preciznosti u proceduri raspodele opterećenja saobraćajne mreže.
2. Kod linkova koji se koriste ispod granice kapaciteta, BPR funkcija, naročito pri velikim vrednostima β , uvek obezbeđuje identičnu vrednost vremena putovanja kao i u uslovima slobodnog toka, bez obzira na promene protoka saobraćaja. Na primer, ukoliko je kapacitet saobraćajnice 1000 voz/h vreme putovanja na osnovu BPR funkcije sa koeficijentom $\beta=12$, će biti identično i pri opterećenju od 1 voz/h i pri 300 voz/h. Na taj način, na lokalnom nivou ekvilibrijum model opterećenja se transformiše u model opterećenja „sve ili ništa“, gde i najmanje promene (ili greške) u vremenu putovanja u uslovima slobodnog toka mogu prouzrokovati transfer saobraćajnog opterećenja sa jednog linka na drugi.
3. Iako je BPR funkcija veoma jednostavna, njena procena zahteva izračunavanje logaritamske i eksponencijalne funkcije u uspostavljanju

zavisnosti između vremena putovanja i protoka saobraćaja kao i definisanje koeficijenta β .

Predložena Konusna FVP ima sledeći oblik:

$$t = (2 + \sqrt{\alpha^2(1-x)^2 + \beta^2} - \alpha(1-x) - \beta)t_0 \quad \text{gde je:} \quad \beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2}$$

t_0 – vreme putovanja u uslovima slobodnog toka

x – koeficijent iskorišćenja kapaciteta (stepen zasićenja)

Za koeficijent α preporučuje se vrednost veća od 1. Testiranjem opisane funkcije, u odnosu na BPR funkciju, ostvaruje se bolja konvergencija u proceduri saobraćajnog opterećenja ekvilibrijum. Važno je istaći da nisu zabeležene značajne razlike kada je reč o raspodeli saobraćajnog opterećenja na uličnoj mreži (Spiess, 1990). Za potrebe planiranja saobraćaja, preporuke date od strane regionalnog saveta za razvoj Minesote su da α treba da uzima vrednost 4 za saobraćajnice sa razdelnim ostrvima, a za saobraćajnice bez razdelnih ostrva vrednost 5 (Davis & Xiong, 2007). Konusna funkcija takođe kao ni BPR funkcija ne uzima eksplicitno u obzir signalisane raskrsnice.

Funkcija vremena putovanja iz priručnika HCM iz 2000. godine

U priručniku HCM iz 1994. godine, za utvrđivanje nivoa usluge, koriste se vremenski gubici zaustavljenog vozila. U priručniku HCM iz 1997. godine, po prvi put, se uvodi pojam „upravljačkih gubitaka“ (gubici prouzrokovani primenjenim načinom upravljanja). Izraz za utvrđivanje vremenskih gubitaka ostao je nepromenjen i u narednim verzijama ovog priručnika (HCM iz 2000. godine, odnosno HCM iz 2010. godine) (Čelar, 2013).

$$d_{1994} = d_1 DF + d_2 \quad \text{HCM 1994}$$

$$d_{1997} = d_1 PF + d_2 + d_3 \quad \text{HCM 1997}$$

d_{1994} – prosečni gubici zaustavljenog vozila na raskrsnici

d_{1997} – prosečni vremenski gubici na raskrsnici

d_1 – prosečni uniformni vremenski gubici

d_2 – prosečni dodatni vremenski gubici

d_3 – prosečni inicijalni vremenski gubici

DF/PF – faktor progresije, odnosno uticaj tipa nailazećeg plotuna vozila na raskrnicu na vrednost uniformnih vremenskih gubitaka.

Za slučajan tip nailaska vozila, vrednost faktora PF je jednaka jedinici. U ostalim slučajevima se proračunava na osnovu obrazca:

$$PF = \frac{(1 - P)f_{PA}}{1 - \frac{g}{C}}$$

P – učešće vozila koja stižu na raskrnicu tokom zelenog signalnog pojma

g – dužina trajanja zelenog signalnog pojma

C – dužina trajanja ciklusa

f_{PA} – faktor koji zavisi od tipa nailazećeg plotuna vozila

FVP u skladu sa preporukama novijih izdanja HCMa predstavljena je na sledeći način (HCM 2000; HCM 2010):

$$TT = T_R + d_{1997}$$

TT – prognozirano prosečno vreme putovanja

T_R – deo vremena putovanja dok je vozilo u kretanju

Uniformni vremenski gubici podrazumevaju da se saobraćajni proces realizuje u nezasićenom stanju, pod pretpostavkom da je reč o ravnomernom nailasku vozila na raskrnicu.

$$d_1 = \frac{0,5C(1 - \frac{g}{C})^2}{1 - \left[\min(1, x) \frac{g}{C} \right]}$$

x – koeficijent iskorišćenja kapaciteta

Proračun slučajnih i vremenskih gubitaka usled prezasićenja podrazumeva da se u pojedinim ciklusima formirani red ne isprazni tokom trajanja zelenog signalnog pojma. Takođe, u ovom slučaju se pretpostavlja da nailazak vozila na raskrnicu nije ravnomeran već se može opisati Poasonovom raspodelom.

$$d_2 = 900T \left[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8kIx}{cT}} \right]$$

T – dužina perioda posmatranja

k – faktor uticaja načina rada svetlosnih signala

I – faktor uticaja prethodne raskrsnice

c – kapacitet

Proračun prosečnih inicijalnih vremenskih gubitaka je dat formulom:

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1 + u)t}{cT}$$

Q_b – inicijalni red na početku perioda T

c – kapacitet

T – dužina perioda posmatranja

t – dužina perioda u kome postoji neopsluženi saobraćajni zahtev kao posledica postojanja inicijalnog reda

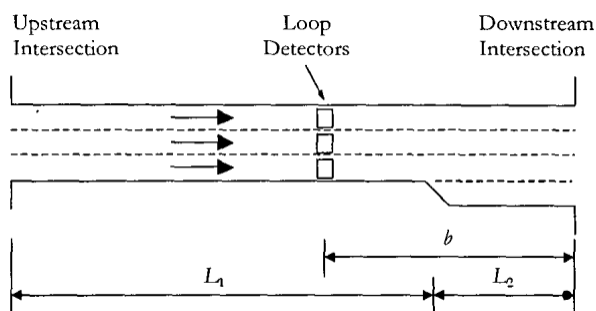
u – parametar vremenskih gubitaka (vrednost parametra u = 0 ukoliko $t < T$; u drugom slučaju se izračunava $u = 1 - (cT/Q_b(1 - \max(1, x)))$)

Ovako formulisana FVP obezbeđuje visok nivo preciznosti procene vremena putovanja. Ono što je ne preporučuje, kada je reč u planerskim procedurama i modelima opterećenja mreže, je visok nivo složenosti i veliki broj parametara koje treba definisati, a koji se razlikuju u odnosu na karakteristike raskrsnica. Između ostalog, potrebno je poznavati protoke saobraćaja, signalne planove, a kod analizirane FVP potrebno je poznavati i tip nailaska plotuna vozila na raskrsnicu. Imajući u vidu da je u modelima planiranja saobraćaja uglavnom reč o velikim saobraćajnim mrežama, sa velikim brojem raskrsnica, to predstavlja otežavajuću okolnost. Proračun vremenskih gubitaka na raskrsnici u iterativnim procedurama raspodele saobraćajnog opterećenja podrazumevao bi proračun novih vrednosti vremenskih gubitaka u svakoj novoj iteraciji algoritma opterećenja. Ovo bi imalo značajan uticaj na vreme dostizanja ekvilibrijuma saobraćajne mreže.

Singapur model funkcije vremena putovanja

U okviru istraživanja sprovedenih u Singapuru, za formiranje modela procene brzine na gradskim saobraćajnicama korišćena su dva izvora podataka: podaci

dobijeni metodom plutajućeg vozila, i podaci dobijeni sa induktivnih petlji. Metodologija je podrazumevala podelu svake analizirane deonice na dva segmenta dužine L1 i L2 (Slika 26).



Slika 26 Analizirani segment deonice i pozicija detektora (Xie, Cheu, & Lee, 2001)

Na segmentu L2 se tokom trajanja crvenog signalnog pojma formira red vozila. Formiranjem reda ometa se proces merenja brzine i vremena putovanja na deonici. Iz tog razloga se u proceduri procene brzine segment L2 izuzima iz razmatranja. Plutajućim vozilom merene su brzine i vreme putovanja samo na segmentu L1. Važno je istaći da su zabeležena smanjenja brzine vozila na segmentu L1, koja nastaju kao posledica nailaska vozila na narednu signalisanu raskrsnicu, ili kao posledica formiranja reda na narednoj raskrsnici, uzeta u obzir kao deo vremenskih gubitaka na signalisanoj raskrsnici.

I u slučaju ovog modela vreme putovanja je posmatrano kao zbir vremena putovanja na deonici i vremenskih gubitaka na raskrsnici. U predloženom modelu proračun vremenskih gubitaka na raskrsnici baziran je na Webster-ovoj formulaciji (Webster, 1958).

$$d = 0,9\phi \left[\frac{C(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} \right]$$

d – vremenski gubici na signalisanoj raskrsnici

C – dužina trajanja ciklusa (s)

λ – učešće zelenog signalnog pojma u ciklusu (g/C)

x – koeficijent iskorišćenja kapaciteta (protok/kapacitet)

q – nailazeći protok vozila

ϕ – deo vremenskih gubitaka na segmentu L1

$$\phi = \begin{cases} \frac{(C-g)q - L2}{(C-g)q}, & \text{ako } (C-g)q \geq b \\ 0, & \text{ako } (C-g)q < b \end{cases}$$

Predložena funkcija je primenljiva i u slučaju kada se posmatra deonica u celini, odnosno za $L2=0$ i $\phi=1$. Konačan oblik ove funkcije vremena putovanja predstavljen je sledećim izrazom i poznat je kao Singapur model (Xie et al., 2001):

$$t = \frac{L}{V_0} + 0,9 \left[\frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right]$$

L – dužina deonice

V_0 – brzina slobodnog toka

Uticaj trećeg člana osnovnog izraza Webster-ovog modela vremenskih gubitaka na raskrsnici u slučaju ove funkcije je kvantifikovan sa 10%. Ograničenje ove funkcije predstavlja domen. Za vrednosti $x>1$, poslednji deo funkcije vezan za vremenske gubitke na raskrsnici postaje negativan. Za potrebe modela koji se koriste u planiranju saobraćaja, neophodno je da funkcija vremena putovanja bude prilagođena i za vrednosti $x>1$.

Model funkcije vremena putovanja Skabardonis – Dowling

Skabardonis i Dowling 1997. godine predložili su unapređen oblik funkcije vremena putovanja na gradskoj uličnoj mreži (Skabardonis & Dowling, 1997). Kao osnovno obrazloženje navode da postojeće FVP koje se promenjuju u procedurama planiranja saobraćaja, a koje su bazirane na iskorišćenju kapaciteta, ne opisuju na realan način vreme putovanja na alternativnim trasama, jer ne uzimaju u obzir vremenske gubitke na signalisanim raskrsnicama. Funkcija je formirana iz nekoliko koraka, a za osnovu su uzete preporuke za proračun vremenskih gubitaka iz priručnika HCM iz 1994. godine.

Najjednostavniji pristup u analizi efekta signalisane raskrsnice u određivanju brzine slobodnog toka na uličnoj mreži, je uključivanje vremenskih gubitaka na raskrsnici pri veoma niskim vrednostima protoka saobraćaja. U slučaju BPR funkcije i prethodno formulisanih modela, za brzinu slobodnog toka tretirana je

brzina ostvarena na sredini deonice, poštujući ograničenje brzine. U slučaju idealne progresije (učešće zelenog signalnog pojma u ciklusu veće ili jednako 50%) ovakav pristup imao bi smisla, dok u ostalim slučajevima ne reprezentuje realnu situaciju zato što se ne uzima u obzir uticaj raskrsnice.

Prema HCM 1994 za odnos $q/C=0$ proračun vremenskih gubitaka vozila na raskrsnici imao bi sledeći oblik:

$$d = 0.5 \cdot DF \cdot C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2$$

DF – faktor progresije (u funkciji tipa nailaska plotuna vozila na raskrsnicu)

C – dužina trajanja ciklusa

g – dužina trajanja zelenog signalnog pojma

Ovi vremenski gubici se odnose na vreme čekanja vozila u redu (prema priručniku HCM iz 1994. godine, procena ukupnih vremenskih gubitaka na raskrsnici se dobija množenjem vremenskog gubitka vozila provedenog u redu sa 1.3).

Korigovana brzina slobodnog toka je proračunata na osnovu vremena putovanja na deonici pri brzini slobodnog toka i vremenskih gubitaka na raskrsnici:

$$V_0 = \frac{L}{\frac{L}{V_{0d}} + \frac{N \cdot d}{3600}}$$

L – dužina deonice

V_{0d} – brzina slobodnog toka na sredini deonice

N – broj signala

Testirajući postojeće funkcije vremena putovanja u odnosu na bazu podataka iz priručnika HCM iz 1994. godine, dobijeno je da modifikovana BPR funkcija vremena putovanja sa vrednostima parametara $\alpha=0.05$ i $\beta=10$ najpribližnije oslikava vreme putovanja na uličnoj mreži.

$$V = \frac{V_0}{\left(1 + 0,05\left(\frac{q}{c}\right)^{10}\right)}$$

q – protok saobraćaja

c – kapacitet deonice

Na osnovu ovoga, konačna formulacija predloženog modela proračuna vremena putovanja na uličnoj mreži glasi:

$$t = \left(\frac{L}{V_{0d}} + \frac{0,5NC(1 - \frac{g}{C})^2 DF}{3600} \right) \left(1 + 0,05 \left(\frac{q}{c} \right)^{10} \right)$$

t – prognozirano vreme putovanja

Ako analizirana deonica sadrži samo jednu signalisanu raskrnicu, formulacija može biti pojednostavljena.

$$TT \approx \left(\frac{L}{V_{0d}} + 0,5(1 - P)(C - g) \right) \left(1 + 0,05 \left(\frac{v}{c} \right)^{10} \right)$$

P – procenat vozila koja su raskrnicu naišla tokom trajanja zelenog signalnog pojma

Pozitivnu karakteristiku predložene funkcije predstavlja njena primenljivost i na neprekinute i na prekinute saobraćajne tokove u urbanim i ruralnim sredinama. Pogodna je za sveobuhvatne planerske analize i jednostavna za korišćenje, iako je metodološki ostavljeno prostora za unapređenje procedure utvrđivanja vrednosti brzine slobodnog toka.

PRILOG III Teorijski modeli utvrđivanja vrednosti zasićenog saobraćajnog toka

Webster-ov model procene vrednosti zasićenog saobraćajnog toka

Webster i Cobbe su 1966. godine predložili model za izračunavanje bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za tok vozila u kretanju pravo (Webster & Cobbe, 1966). Bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka je izražena u PAJ (putnički automobil jedinicama), a data je u funkciji širine posmatranog prilaza raskrsnici:

$$S = 525w$$

w – širina prilaza izražena u metrima ($18.3 > w > 5.15$)

Za širine prilaza manje od 5.15 m predložene su vrednosti predstavljene u tabeli 83.

Tabela 83 Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za odgovarajuće širine prilaza

w(m)	2.7	3	4	4.5	5.15
S(voz/h)	1790	1850	1950	2250	2700

Iskustva su pokazala da za definisanje zasićenog saobraćajnog toka broj saobraćajnih traka na prilazu predstavlja bolji pokazatelj od širine prilaza.

U okviru pomenutog modela definisani su i ostali korektivni faktori uticaja na vrednost ZST (Tabela 84).

Tabela 84 Faktori uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka (Webster-ov model)

Faktor uticaja	Kvantifikacija uticaja
Uticaj perioda dana	Vrednost ZST je u vanvršnom periodu manja za 6%, što je obrazloženo većim stepenom ležernosti vozača.
Uticaj uzdužnog nagiba	Za 1% pozitivnog nagiba prilaza vrednost ZST opada za 3%, do maksimalnih 30%. Za 1% negativnog nagiba prilaza vrednost ZST raste za 3%, do maksimalnih 15%.
Uticaj strukture saobraćajnog toka	Definisane su pripadajuće vrednosti PAJ ekvivalenata za svaku kategoriju vozila (1.75 za teško teretno vozilo; 2.25 za autobus (više od 20 putnika); 1 za lako teretno vozilo i mini bus (manje od 20 putnika); 0.33 za motocikl; 0.2 za bicikl)

<p>Uticaj vozila u levom skretanju</p>	<p>Za zaštićeno levo skretanje (posebna saobraćajna traka):</p> $s = \frac{1800}{1 + \frac{1.515}{r}} \left(\frac{PAJ}{čas} \right)$ za jednu saobraćajnu traku $s = \frac{3000}{1 + \frac{1.515}{r}} \left(\frac{PAJ}{čas} \right)$ za dve saobraćajne trake <p>r – radijus levog skretanja</p> <p>U mešovitoj saobraćajnoj traci vozilo u levom skretanju je ekvivalentno 1.75 vozila u kretanju pravo.</p>
<p>Uticaj vozila u desnom skretanju</p>	<p>Ukoliko se radi o mešovitoj traci, za procenat desnih skretanja preko 10%, preporučuje se korekcija vrednosti zasićenog toka koji iznosi 1.25, u odnosu na jediničnu vrednost koja se odnosi na tok vozila pravo.</p>
<p>Uticaj parkiranih vozila</p>	<p>Kvantifikovan je narednim izrazom:</p> $f_{pv} = 1.68 - \frac{0.9(z-7.62)}{g}$ <p>z – rastojanje parkiranog vozila od zaustavne linije (m) g – dužina trajanja zelenog signalnog pojma (s)</p>
<p>Uticaj okruženja raskrsnice</p>	<p>Uticaj okruženja raskrsnice podrazumeva veći broj manje uticajnih faktora i opisan je kvalitativno kao: dobar, prosečan i loš. Preporuke su da se za dobre uslove okruženja vrednost ZST poveća za 35% dok se za loše uslove redukuje za 30%. U uslovima intenzivnih pešačkih tokova, faktor uticaja pešačkih tokova je implementiran kroz uticaj okruženja raskrsnice.</p>

Model za proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka iz priručnika HCM

Model HCM-a je definisan od strane Savezne direkcije za puteve (Federal highway administration – FHWA) predstavlja jedan od najčešće korišćenih modela za proračun vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, zbog fleksibilnosti u prilagođavanju lokalnim karakteristikama (Highway capacity manual, 2000).

$$S = S_o N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT}$$

S_o – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka (1900 PA/čas)

N – broj saobraćajnih traka iste namene

f_w – faktor uticaja širine saobraćajne trake

f_{HV} – faktor uticaja strukture saobraćajnog toka

f_g – faktor uticaja uzdužnog nagiba

f_p – faktor uticaja parkiranja

f_{bb} – faktor uticaja autobuskih stajališta

f_a – faktor uticaja mikrolokacije raskrsnice

f_{LU} – faktor uticaja korišćenja saobraćajne trake

f_{LT} – faktor uticaja levih skretanja

f_{RT} – faktor uticaja desnih skretanja

Početna pretpostavka modela je bazirana na redukovanju bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (od 1900 PAJ/čas) na operativnu vrednost pod uticajem korektivnih faktora predstavljenih u tabeli 85.

Tabela 85 Faktori uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka (HCM model)

Faktor uticaja	Kvantifikacija uticaja
Faktor uticaja širine saobraćajne trake	$f_w = 1 + \frac{(w - 3.6)}{9}$ <p>w – širina saobraćajne trake u metrima $w \geq 2.4$, ukoliko je $w \geq 4.8$ posmatralo bi se kao dve saobraćajne trake</p>
Faktor uticaja strukture saobraćajnog toka	$f_w = \frac{100}{100 + \%HV(E_t - 1)}$ <p>E_t – ekvivalent za svođenje teških teretnih vozila na PAJ ($E_t=2$) $\%HV$ – procenat teških teretnih vozila u saobraćajnom toku</p>
Faktor uticaja uzdužnog nagiba	$f_g = 1 - \frac{\%G}{200}$ <p>$\%G$ – procentualna vrednost nagiba posmatrane saobraćajne trake ($-6 \leq \%G \leq +10$)</p>
Faktor uticaja parkiranja	$f_p = \frac{N - 0,1 - \frac{18N_m}{3600}}{N}$ <p>$1 \leq f_p \leq 0.050$ N – broj saobraćajnih traka iste namene N_m – broj parking manevara na čas ($0 \leq N_m \leq 180$)</p>

<p>Faktor uticaja autobuskih stajališta</p>	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_b}{3600}}{N}$ $f_{bb} \geq 0.05$ <p>N – broj saobraćajnih traka iste namene N_b – broj autobusa koji se zaustavljaju na stajalištu (bus/h) $(0 \leq N_b \leq 250)$</p>
<p>Faktor uticaja mikrolokacije raskrsnice</p>	$f_a = 0.9$ za raskrsnicu u centralnoj gradskoj zoni $f_a = 1$ za raskrsnicu van centralne gradske zone
<p>Faktor uticaja korišćenja saobraćajne trake</p>	$f_{LU} = \frac{V_g}{V_{g1}N}$ <p>V_g – ukupno saobraćajno opterećenje posmatrane grupe saobraćajnih traka (voz/h) V_{g1} – maksimalno saobraćajno opterećenje pojedinačne trake u posmatranoj grupi saobraćajnih traka (voz/h) N – broj saobraćajnih traka iste namene</p>
<p>Faktor uticaja levih skretanja</p>	<p>Zaštićeno levo skretanje (ekskluzivna saobraćajna traka) $f_{LT} = 0.95$</p> <p>Zaštićeno levo skretanje (mešovita saobraćajna traka) $f_{LT} = \frac{1}{1 + 0.05P_{LT}}$ P_{LT} – procenat vozila u levom skretanju Procedura proračuna faktora uticaja za nezaštićena leva skretanja je složenija i detaljnije je objašnjena u HCM priručniku.</p>
<p>Faktor uticaja desnih skretanja</p>	$f_{RT} = 0.85$ za posebno izdvojenu saobraćajnu traku $f_{RT} = 1 - (0.15P_{RT})$ za mešovitu saobraćajnu traku $f_{RT} = 1 - (0.135P_{RT})$ za saobraćajnu traku desno $f_{RT} \geq 0.05$ P_{RT} – procenat vozila u desnom skretanju

Pored navedenih faktora uticaja u proceduri proračuna zasićenog saobraćajnog toka primenjuju se faktori uticaja konfliktnih tokova pešaka/biciklista i vozila u levom i desnom skretanju (f_{Lpb} i f_{Rpb}). Procedura primene ovih faktora uticaja je kompleksnija i sastoji se iz nekoliko koraka. Procedura je detaljno objašnjena u HCM priručniku.

Handbuch für die bemessung von strassenverkehrsanlagen (HBS)

HBS je Nemački priručnik za proračun i vrednovanje saobraćajnih mreža (FGSV, 2001). Formiran je po standardima nemačke inženjerske škole uz konstataciju da postojeće preporuke definisane u verzijama priručnika HCM nisu u potpunosti primenljive za evropsko područje.

Maksimalna vrednost kapaciteta saobraćajne trake na signalisanoj raskrsnici tokom jednog ciklusa, ovim priručnikom je definisana na bazi osnovne veličine prosečnog intervala sleđenja vozila tokom procesa pražnjenja reda.

Izvedena bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka proširena na hipotetički sat vremena zelenog signalnog pojma dobijena je na sledeći način:

$$q_{st} = \frac{3600}{t_f}$$

q_{st} – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka

t_f – prosečna vrednost intervala sleđenje vozila

Priručnikom su za različite vrednosti intervala sleđenja vozila, u odnosu na dužine zelenog signalnog pojma, date preporuke za izbor bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka (Tabela 86).

Tabela 86 Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na trajanje zelenog signalnog pojma (HBS 2001)

Dužina zelenog sig. pojma (s)	Vrednost zasićenog toka (PAJ/h)	Prosečna vrednost intervala sleđenja (s/voz)
>10	2000	1.8
10	2400	1.5
6	3000	1.2

Teorijska postavka za proračun operativne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka definisana priručnikom je:

$$q_s = f_1 f_2 q_{st}$$

q_s – operativna vrednost zasićenog saobraćajnog toka

q_{st} – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka

f_1, f_2 – korektivni faktori (od navedenih pet korektivnih faktora, iz naredne tabele, za koje je utvrđeno da imaju uticaj na operativnu vrednost zasićenog toka, biraju se dva sa najvećim uticajem)

U narednoj tabeli su date vrednosti korekcionih faktora zasićenog saobraćajnog toka (Tabela 87).

Tabela 87 Vrednosti korekcionih faktora (HBS 2001)

Uticajni faktor	Karakteristike	Kvantitativna vrednost faktora
Procenat teških teretnih vozila u saobraćajnom toku (TTV)	< 2%	1,00
	od 2 do 15 %	$1 - 0,0083e^{0,21(\%TTV)}$
	> 15%	$1/(1 + 0,015(\%TTV))$
Širina saobraćajne trake	2,60 m	0.85
	2,75 m	0.90
	< 3,00 m	1.00
Radijus skretanja	≤ 10 metara	0.85
	≤ 15 metara	0.90
	> 15 metara	1.00
Nagib terena	+ 5%	0.85
	+ 3%	0.90
	0	1.00
	- 3%	1.10
	- 5%	1.15
Intenzitet konfliktnog pešačkog toka	jak	0.80
	srednji	0.90
	slab	1.00

Akčelikov model proračuna vrednosti zasićenog saobraćajnog toka

Akčelikovog model proračuna vrednosti zasićenog saobraćajnog toka je konceptualno veoma sličan prethodno navedenim modelima. Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka su definisane u odnosu na tip okruženja i namenu saobraćajne trake (Akcelik, 1981) (Tabela 88). Pod tipovima okruženja raskrsnice podrazumevani su:

Tip A – Idealni ili skoro idealni uslovi na prilazu i izlazu raskrsnice za neometano kretanje vozila kroz raskrsnicu: dobra preglednost, mali uticaj pešaka, nepostojanje nikakvog uticaja od strane parkiranih vozila i vozila za snabdevanje (tipično za prigradske zone)

Tip B – Prosečni uslovi: adekvatna geometrija raskrsnice, mali ili srednji intenzitet pešačkih tokova, postojanje blagog uticaja vozila za snabdevanje i manevara parkiranja, vozila dolaze i napuštaju područje (tipično za industrijske i trgovačke zone)

Tip C – Loši uslovi: veliki broj pešaka, loša preglednost, uticaj zaustavljenih vozila i vozila za snabdevanje, intenzivan uticaj parking manevara, uticaj vozila javnog prevoza i taksi vozila (tipično za centralnu gradski zonu)

Tabela 88 Bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na tip okruženja i namenu saobraćajne trake

Tip okruženja	Namena saobraćajne trake		
	Saobraćajna traka namenjena samo kretanju pravo	Saobraćajna traka namenjena za skretanje bez obzira na smer i namenu trake (podrazumevan je pogodan radijus skretanja i veoma mali uticaj pešačkih tokova na tok vozila)	Saobraćajna traka namenjena za skretanje bez obzira na smer i namenu trake (podrazumevan je oštrij radijus skretanja i značajan uticaj pešačkih tokova na tok vozila)
A	1850	1810	1700
B	1700	1670	1570
C	1580	1550	1270

Pored navedenih faktora koji imaju uticaja u formiranju bazne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka, procena operativne vrednosti podrazumeva uzimanje u obzir širi opseg uticajnih faktora.

$$S = \left(f_w \frac{f_g}{f_c} \right) s_b$$

s – operativna vrednost zasićenog saobraćajnog toka

s_b – bazna vrednost zasićenog saobraćajnog toka

f_w – faktor uticaja širine saobraćajne trake

f_g – faktor uticaja uzdužnog nagiba

f_s – faktor uticaja strukture saobraćajnog toka

U narednoj tabeli su prikazane kvantitativne vrednosti korektivnih faktora koje Akčelikov model procene vrednosti saobraćajnog zasićenog toka uzima u obzir (Tabela 89).

Tabela 89 Faktori uticaja na vrednost zasićenog saobraćajnog toka

Faktor uticaja	Kvantifikacija uticaja
Faktor uticaja širine saobraćajne trake	U rasponu širine saobraćajne trake od 3 do 3.7m ne postoji uticaj. Za širine van navedenog opsega uticaj se proračunava $f_w = \begin{cases} 0.55 + 0.14w & \text{od 2.4 do 3m} \\ 0.83 + 0.05w & \text{od 3.7 do 4.6m} \end{cases}$ w – širina saobraćajne trake $0.89 \leq f_w \leq 1.06$
Faktor uticaja uzdužnog nagiba	$f_g = 1 \pm 0,5 \left(\frac{G_r}{100} \right)$ G_r – veličina uzdužnog nagiba (%)
Faktor uticaja strukture saobraćajnog toka	$f_c = \frac{\sum e_i q_i}{q}$ q_i – saobraćajni tok u vozilima za smer skretanja i q – ukupan saobraćajni tok e_i – ekvivalent prevođenja vozila u PAJ, u zavisnosti od tipa vozila i

	tipa skretanja Ekvivalenti prevođenja PA u odnosu na tip skretanja su definisani u odnosu na to da li je reč o bezkonfliktim kretanjima ili je reč o kretanjima koja imaju dozvoljen konflikt, i da li je reč o mešovitoj odnosno ekskluzivnoj saobraćajnoj traci. U okviru modela su podrazumevane samo dve kategorije vozila, putnička i teška teretna vozila.
--	---

Model proračuna vrednosti zasićenog saobraćajnog toka za lokalne uslove

U okviru doktorske disertacije Branimira Stanića iz 1991. godine postignut je do tada najveći pomak kada je u pitanju istraživanje vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u domaćim uslovima (Stanić, 1991). Za razliku od prethodno navedenih modela akcent u proračunu vrednosti zasićenog saobraćajnog toka nije stavljen na geometriju raskrsnice. U formiranom modelu definisane su tri osnovne kategorije zasićenog saobraćajnog toka: idealan, operativan i bazni. Operativni zasićeni tok je predstavljen kao redukcija idealnog zasićenog toka pod uticajem faktora okruženja i tipa signalnog plana. Formulacija predloženog modela proračuna vrednosti zasićenog toka izvedena je na sledeći način:

$$S = S_{op} N f_1 f_2 f_3 f_4$$

S_{op} – operativna vrednost zasićenog toka (ova vrednost se definiše na osnovu tipa signalnog plana i namene saobraćajne trake)

N – broj saobraćajnih traka iste namene

f_1 – faktor uticaja intenziteta pešačkog toka na vozila u skretanju

f_2 – faktor uticaja intenziteta konfliktnog toka

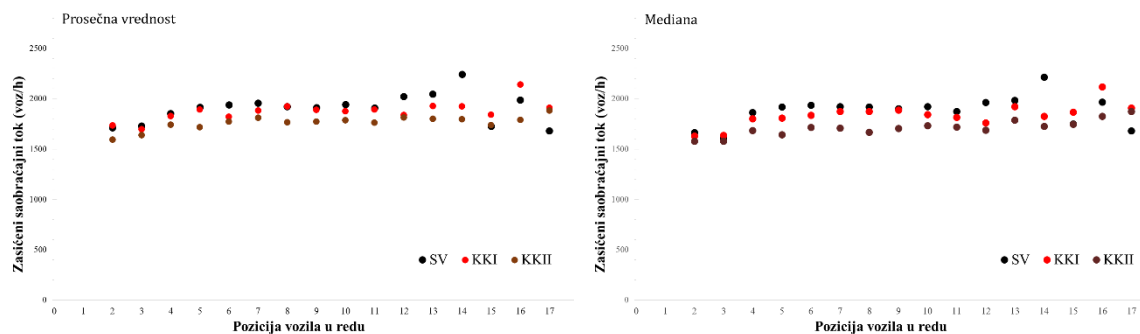
f_3 – faktor uticaja strukture saobraćajnog toka

f_4 – faktor uticaja veličine grada

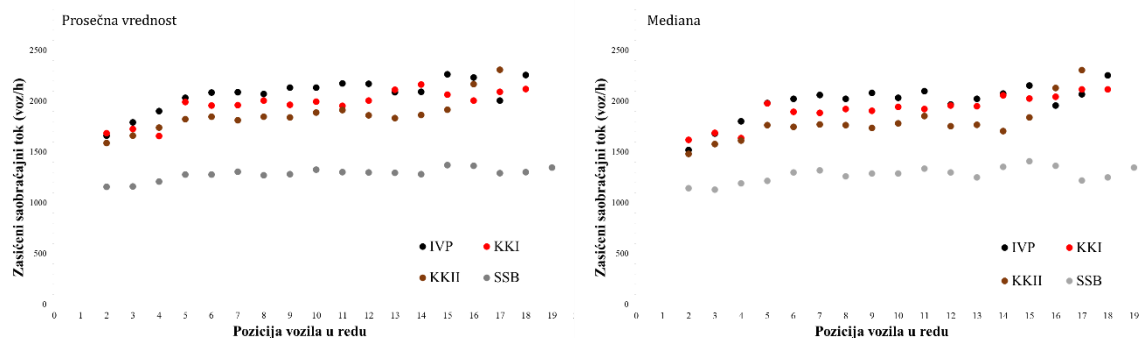
Kada je reč o kriterijumima za usvajanje operativne vrednosti zasićenog saobraćajnog toka i vrednostima korektivnih faktora, u okviru istraživanja izvršena je kvantifikacija svih pomenutih vrednosti u odnosu na zabeležene varijacije saobraćajnih uslova.

PRILOG IV Vrednosti zasićenog saobraćajnog toka u odnosu na poziciju vozila i primenjenu metodu proračuna.

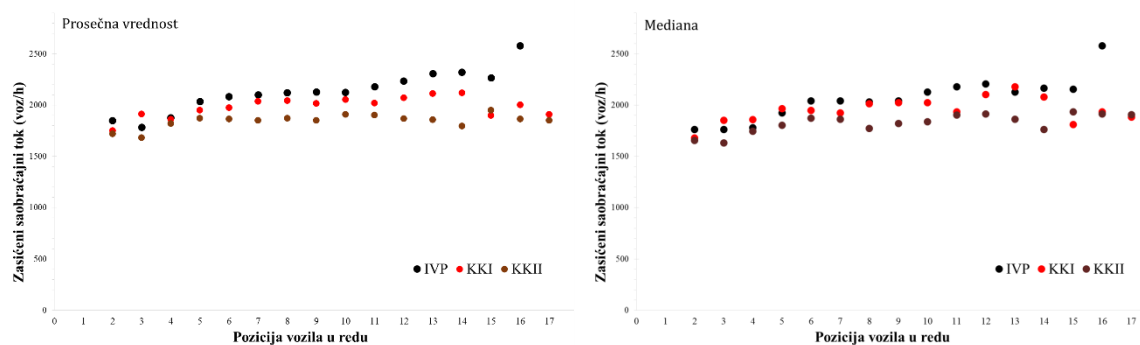
Lokacija 2



Lokacija 3



Lokacija 4



PRILOG V Programski kod za generisanje koeficijenta BPR funkcije na osnovu eksperimentalno utvrđenih podataka (MatLabR2016a)

```
t0=?; %Upisuje se vreme putovanja pri brzini slobodnog toka
C=?; %OUpisuje se kapacitet
qkrozC=[]; %Ulazni podaci za q/C
t=[]; %Ulazni podaci za vreme putovanja t
%Zbog odabrane metode kod unosa vrednosti mora da se vodi računa da t-t0=0 odnosno da t ne
sme da bude jednako t0
y1=(t-t0)/t0;
nx=numel(qkrozC); %Određuje se broj članova niza q/C
ny=numel(y1); %Određuje se broj članova niza t
if (nx~=ny)|(nx==0)|(ny==0) %Proverava da li su uneti podaci u redu u smislu jednakog broja
članova niza
    disp('GRESKA!');
    return;
else
    n=nx;
end
x=log(qkrozC);
y=log(y1);
alpha=0.01; %Početne vrednosti parametara (ne smeju biti 0) (Opciono)
beta=0.01;
sum=0;
for i=1:n
    sum=sum+(y(i)-x(i)*beta-log(alpha))^2; %Formira se suma kvadrata odstupanja
end
sumMin=sum; %U prvoj iteraciji minimalna suma je ona koja je prva izračunata
alphaT=alpha;
betaT=beta;
for alpha=0.02:0.001:5 %Na osnovu podataka iz pregleda literature zadato je da alpha ide do 2.5 a
beta do 8 (Opciono), sa korakom 0.001
for beta=0.02:0.001:8
    sumNew=0; %U narednih nekoliko redova primenjuje se metoda minimizacije sume kvadrata
odstupanja
    for i=1:n
        sumNew=sumNew+(y(i)-x(i)*beta-log(alpha))^2;
    end
    if (sumNew<sumMin)
        sumMin=sumNew;
        alphaT=alpha;
        betaT=beta;
    end
end
end
x_pom=0:0.01:1.5;
plot(qkrozC, t, '*b', x_pom, (t0+alphaT*t0*(x_pom.^betaT)), '-r');
grid;
xlabel('Vrednost q/C');
ylabel('Vrednost t');
title('Grafik zavisnosti t=f(q/C)');
fprintf('Alpha optimalno je: %0.3f, a beta optimalno je: %0.3f, alphaT, betaT);
```

PRILOG VI Programski kod za modifikaciju BPR funkcije u odnosu na uticaj nepovoljnih vremenskih prilika (MatLabR2016a)

```
v0=?; %Slobodna brzina referentne krive
alpha0=?; %Alpha referentne krive
beta0=?; %Beta referentne krive
v01=?; %Slobodna brzina druge krive
C=?; %Definiše se C druge krive
qkrozC=[0.85 0.9 ...]; %Ulazni podaci za q/C
v=[(v0./(1+alpha0*(0.85^beta0))) (v0./(1+alpha0*(0.9^beta0))) ...];%Ulazni podaci za vreme
putovanja sa tačkama sa referentne krive
%Zbog odabrane metode kod unosa vrednosti mora da se vodi računa da t-t0=0 odnosno da t ne
sme da bude jednako t0
y1=(v01-v)./v;
nx=numel(qkrozC); %Odeđuje se broj članova niza qkrozC
ny=numel(y1);
if (nx~=ny)|(nx==0)|(ny==0) %Proverava da li su uneti podaci u redu u smislu jednakog broja
članova niza
    disp('GRESKA!');
    return;
else
    n=nx;
end
x=log(qkrozC);
y=log(y1);
alpha=0.01; %Početne vrednosti parametara (ne smeju biti 0)(Opciono)
beta=0.01;
sum=0;
x_konv=1;%Definiše se tačka u kojoj se želi postići konvergencija
krit_konv=0.5;%Definiše se kriterijum konvergencije
for i=1:n
    sum=sum+(y(i)-x(i)*beta-log(alpha))^2; %Formira se suma kvadrata odstupanja
end
sumMin=sum; %U prvoj iteraciji minimalna suma je ona koja je prva izračunata
alphaT=alpha;
betaT=beta;
for alpha=0.02:0.001:5 Na osnovu podataka iz pregleda literature zadato je da alpha ide do 2.5 a
beta do 8 (Opciono), sa korakom 0.001
    for beta=0.02:0.001:8
        sumNew=0; %U narednih nekoliko redova primenjuje se metoda minimizacije sume kvadrata
odstupanja.
        for i=1:n
            sumNew=sumNew+(y(i)-x(i)*beta-log(alpha))^2;
        end
        if (sumNew<sumMin)
            if (abs((v0./(1+alpha0*(x_konv^beta0)))-(v01./1+alpha*(x_konv^beta))<=krit_konv))
                sumMin=sumNew;
                alphaT=alpha;
                betaT=beta;
            end
        end
    end
end
x_pom=0:0.01:1.5;
plot(qkrozC, v, '*r', x_pom, (v0./(1+alpha0*(x_pom.^beta0))), '-b', x_pom,
(v01./(1+alphaT*(x_pom.^betaT))), '-r');
```

```
grid;
xlabel('Vrednost q/C');
ylabel('Vrednost v');
title('Grafici zavisnosti t=f(q/C)');
fprintf('Razlika vrednosti f-ja u tacki q/C=1 je: %0.3f\n', abs((v0./((1+alpha0*(1^beta0)))-
(v01./((1+alphaT*(1^betaT))))));
fprintf('Alpha optimalno druge krive je: %0.3f, a beta optimalno druge krive je: %0.3f\n', alphaT,
betaT);
```


Biografija autora

Ivan Ivanović je rođen 1982. godine u Beogradu. Osnovnu školu je završio u Kovinu kao nosilac Vukove diplome. Srednju elektrotehničku školu Nikola Tesla u Beogradu završio je 2001. godine. Diplomirao je 2007. godine na Saobraćajnom fakultetu Univerziteta u Beogradu na Odseku za drumski i gradski saobraćaj i transport sa prosečnom ocenom 8.34. Diplomski rad na temu „GIS u saobraćajnom inženjerstvu –iskustva u našim uslovima“ odbranio je sa ocenom 10. Od 2008. godine je zaposlen na radnom mestu saradnika u nastavi na katedri za Saobraćajno inženjerstvo. Od 2010. godine je zaposlen kao asistent na Univerzitetu u Beogradu – Saobraćajnom fakultetu za užu naučnu oblast „Planiranje saobraćaja i saobraćajne infrastrukture“. Doktorske studije je upisao 2010. godine i položio sve ispite predviđene programom, sa prosečnom ocenom 10.

Autor je i koautor 6 naučnih radova objavljenih u: časopisima međunarodnog značaja (3 rada u časopisima na SCI listi, od kojih je poslednji u proceduri objave); nacionalnog značaja (3 rada); na naučnim i stručnim skupovima od međunarodnog značaja (14 radova). Kao član autorskog tima je učestvovao u 11 saobraćajnih studija i projekata od strateškog značaja i 2 naučna projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Bio je član komisije za odbranu 4 završna rada. Koautor je pomoćnog udžbenika na predmetima Planiranja saobraćaja. Od 2013. godine član je Inženjerske komore Srbije. Od 2010 godine član je organizacionog odbora savetovanja sa međunarodnim učešćem TES. Član je organizacionog odbora redovne internacionalne radionice “City&Traffic”. Odlično govori engleski i služi se ruskim jezikom. Oženjen je, otac jednog deteta.

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Ivan D. Ivanović

Broj indeksa 09-D-007

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

**MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE MREŽE
ZA RAZLIČITE VREMENSKE PRILIKE**

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

U Beogradu, _____

Potpis autora

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Ivan D. Ivanović
Broj indeksa 09-D-007
Studijski program Saobraćaj
Naslov rada MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE MREŽE ZA
RAZLIČITE VREMENSKE PRILIKE
Mentor Prof. dr Jadranka Jović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao radi pohranjenja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

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

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

U Beogradu, _____

Potpis autora

Izjava o korišćenju

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

MODELIRANJE OPTEREĆENJA ULIČNE MREŽE ZA RAZLIČITE VREMENSKE PRILIKE

koja je moje autorsko delo.

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

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Beogradu, _____

Potpis autora

1. Autorstvo. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerada. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.