

Estimacija prometnih zagušenja urbanih područja temeljena na pokretnim osjetilima

Starčević, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:140773>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Tomislav Starčević

Estimacija prometnih zagušenja urbanih područja temeljena na
pokretnim osjetilima

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 6. travnja 2020.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Telematička sučelja**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 5616

Pristupnik: **Tomislav Starčević (0135238346)**
Studij: **Inteligentni transportni sustavi i logistika**
Smjer: **Inteligentni transportni sustavi**

Zadatak: **Estimacija prometnih zagušenja urbanih područja temeljena na pokretnim osjetilima**

Opis zadatka:

U prvom dijelu rada potrebno je dati pregled i kratki opis veličina koji pokazuju stanja prometnih tokova na cestovnoj prometnoj mreži. Posebno obraditi pokazatelje koji upućuju na zagušenje dijelova prometne mreže. Nadalje, potrebno je dati pregled vrsta i kratki opis pojedinih tehnologija na kojima se temelje pokretna osjetila te prezentirati njihove glavne karakteristike i mogućnosti. U praktičnom dijelu rada temeljem stvarnih podataka od pokretnih osjetila potrebno je estimirati zagušenje i raspodjelu zagušenja na primjeru odabranog grada za kojeg se mogu pribaviti podaci.

Mentor:

**Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:**

izv. prof. dr. sc. Niko Jelušić

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**ESTIMACIJA PROMETNIH ZAGUŠENJA URBANIH
PODRUČJA TEMELJENA NA POKRETNIM OSJETILIMA**

**TRAFFIC CONGESTION ESTIMATION OF URBAN AREA
BASED ON FLOATING CAR DATA**

Mentor: izv.prof.dr.sc. Niko Jelušić

Student: Tomislav Starčević

JMBAG: 0135238346

Zagreb, rujan 2020.

Zahvala

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Niki Jelušiću na mentorstvu prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem se kolegama mag. ing. traff. Dominiku Cveteku i mag. ing. traff. Leu Tišljariću na pomoći i savjetima prilikom izrade rada. Zahvaljujem se i svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na strpljenju i pomoći prilikom studiranja.

*Najveću zahvalu želim iskazati tvrtki **t-matix** na ustupanju podataka za potrebe izrade diplomskog rada.*

ESTIMACIJA PROMETNIH ZAGUŠENJA URBANIH PODRUČJA TEMELJENA NA POKRETNIM OSJETILIMA

Sažetak:

Prometno zagušenje jedan je od najvidljivijih učinaka prometa na stanovništvo, okoliš i gospodarstvo. Prometno zagušenje utječe na stvaranje stresa kod stanovništva, zagađuje okoliš povećanim ispuštanjem štetnih plinova i na kašnjenja koja ekonomski utječu na gospodarstvo. Kako bi se zagušenje estimiralo koriste se razni parametri poput brzine vozila, zasićenosti prometnog toka, vrijeme putovanja i ostali. Kvalitetnim prometnim podacima postižu se i kvalitetne procjene prometnog zagušenja, čime se otvaraju mogućnosti smanjivanja ili uklanjanja prometnog zagušenja. U ovom radu opisano je i primijenjeno estimiranje zagušenja temeljeno na FCD podacima. FCD podaci prikupljeni su s flotom vozila koja se kretala u razdoblju od godine dana na području grada Deutschlandsberga. Kao pokazatelji zagušenja u ovom radu korišteni su indeks smanjenja brzine i pokazatelj *low-speed proportion* koji uspoređuje omjer vremena putovanja pri malim brzinama i ukupnog vremena putovanja. Pokazatelji su prikazani u 24-satnom intervalu pomoću grafova i napravljena je usporedba prometnog zagušenja između dva pokazatelja.

Ključne riječi: prometno zagušenje, estimacija, prosječna brzina vozila, FCD, indeks zagušenja

TRAFFIC CONGESTION ESTIMATION OF URBAN AREA BASED ON FLOATING CAR DATA

Summary:

Traffic congestion is one of the most visible traffic effects on the population, environment and economy. Traffic congestion influences stress level of the population and pollutes the environment by increased air pollution (pollutant emissions), while the traffic delays affect the economy. Various parameters, such as vehicle speed, traffic flow saturation, travelling time and others, are used to estimate congestion. High quality traffic data enables high quality traffic congestion estimates which can help reduce or eliminate traffic congestion. This thesis describes and applies congestion estimations based on Floating Car Data. The FCD was collected from a fleet of vehicles during a period of one year in the city of Deutschlandsberg. As indicators of congestion, this thesis uses the speed reduction index and the low-speed proportion index which compares the ratio of traveling time at low-speeds to total travel time. These indicators were presented using graphs that are showing 24-hour intervals. The comparison of traffic congestion estimation between these two indicators is also described.

Key words: traffic congestion, estimation, average vehicle speed, FCD, congestion index

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
1.1	Ciljevi i svrha rada	2
1.2	Dosadašnja istraživanja	2
1.3	Struktura rada	3
2	OPIS STANJA PROMETA NA CESTOVNOJ PROMETNOJ MREŽI	4
2.1	Vrste i uzroci prometnog zagušenja	4
2.2	Vrste prometnog zagušenja	8
2.2.1	Ponavljajuća zagušenja	8
2.2.2	Neponavljajuća zagušenja.....	11
2.3	Posljedice prometnog zagušenja	13
2.3.1	Posljedice vezane za vozilo	14
2.3.2	Posljedice vezane za gospodarstvo	15
2.3.3	Posljedice vezane za čovjeka i okoliš	17
3	POKAZATELJI ZAGUŠENJA CESTOVNE PROMETNE MREŽE	19
3.1	Osnovni parametri prometnog toka.....	19
3.2	Pokazatelji prometnog zagušenja	21
3.3	Pokazatelji prometnog zagušenja zasnovani na brzini	22
4	PRIMJENA POKRETNIH OSJETILA ZA ODREĐIVANJE STANJA PROMETNE MREŽE.....	23
4.1	Obrada podataka i određivanje stanja prometne mreže	23
4.2	Pokretna osjetila zasnovana na GNSS tehnologiji	23
4.2.1	GPS sustav	25
4.2.2	GLONASS, GALILEO i BeiDou	27
4.3	Protokoli za slanje podataka putem GNSS tehnologije	29
4.4	Obrada FCD podataka i mogućnosti primjene.....	32
4.5	Pokretne ćelijske mreže.....	33
4.5.1	Podjela pokretnih ćelijskih mreža.....	33
4.5.2	Lociranje vozila pomoću ćelijskih mreža	35
4.6	Bluetooth detektori.....	36
4.7	RFID sustav	37

4.8	Automatsko prepoznavanje tablica	38
5	ESTIMACIJA RASPODJELE PROMETNOG ZAGUŠENJA: STUDIJA SLUČAJA NA PRIMJERU AUSTRIJSKOG GRADA DEUTSCHLANDSBERGA.....	40
5.1	Opis sustava prikupljanja i pripreme podataka	40
5.1.1	Prikupljanje podataka.....	40
5.1.2	Priprema podataka	42
5.1.3	Područje prikupljanja podataka.....	45
5.2	Estimacija prometnih zagušenja pomoću indeksa pada brzine	46
5.2.1	Indeks pada brzine	46
5.2.2	Zona1 – zapadni dio grada.....	48
5.2.3	Zona2 – centar grada.....	48
5.2.4	Zona3 – istočni dio grada.....	49
5.2.5	Usporedba zagušenja po zonama	50
5.3	Estimacija prometnih zagušenja pomoću pokazatelja <i>low-speed proportion</i>	51
5.3.1	Pokazatelj <i>low-speed proportion</i>	51
5.3.2	Zona1 – estimacija	52
5.3.3	Zona2 – estimacija	53
5.3.4	Zona3 – estimacija	53
5.4	Usporedba estimacije prometnog zagušenja različitim pokazateljima	54
6	ZAKLJUČAK.....	56
	BIBLIOGRAFIJA.....	58
	POPIS ILUSTRACIJA	61
	POPIS TABLICA I KODOVA.....	62

1 UVOD

Estimacija stanja prometne mreže važna je istraživačka tema u području prometa. Najčešći cilj estimacije stanja prometne mreže je detekcija prometnih zagušenja. Prometna zagušenja nastaju kada je prometna potražnja veća od kapaciteta prometnice. Navedeno se može dogoditi zbog neadekvatne signalizacije, prometne nesreće ili zbog povećane prometne potražnje.

Veliki gradovi privlače sve veći broj stanovnika. Navedeno povlači za sobom i veću potrebu za mobilnošću. Mobilnost uz svoje pozitivne strane kao što je omogućavanje jednostavnijeg putovanja s jednog mjesta na drugo, nosi i negativne efekte kao što su zagađenje i povećano prometno zagušenje. Prometno zagušenje jedno je od glavnih problema velikih gradova, stoga je vrlo važno proučavanje i razvoj metoda za detekciju i moguće predviđanje takvih događaja. Sustavi temeljeni na Inteligentnim transportnim sustavima (ITS) omogućavaju upravo takav pristup rješavanju problema. ITS aplikacije omogućavaju prikupljanje i obradu prometnih podataka, te predstavljaju početnu točku prilikom donošenja odluka za rješavanje prometnih problema. Gradovi s najvećim indeksom prometnog zagušenja u 2019. godini su indijski grad Bengaluru s godišnjom razinom zagušenja od 71%, glavni grad Filipina Manila s također 71%, te glavni grad Kolumbije Bogota s razinom zagušenja od 68%, [1], [2].

Prometno zagušenje često zaustavlja održivi razvoj prometa. Europska komisija izvještava da zagušenje koje je uzrokovano novom povećanom mobilnošću čine 40% svih emisija CO₂ iz cestovnog prometa i do 70% drugih zagađivača u prometu. A, troškovi zagušenja u cijeloj Europskoj Uniji iznose skoro 100 milijardi eura, što je 1% godišnjeg BDP-a Europske Unije, [3]. Prometna zagušenja mogu se kategorizirati kao ponavljajuće (eng. *Recurrent*) zbog velikog broja putnika u vršnim satima, i kao neponavljajuće (eng. *Non-recurrent*) uzrokovano neočekivanim događajima poput prometnih incidenata. U istraživanju [4] navodi se da su 85% svih zagušenja na gradskim prometnicama ponavljajuća zagušenja. S druge strane, u istraživanju [5] navodi se da su 50% svih zagušenja neponavljajuća, a 40% su ponavljajuća. Ključni dijelovi sustava, podržanih od ITS-a (Inteligentnih transportnih sustava) za procese donošenja odluka, jesu otkrivanje i kvantifikacija stanja u prometu za pokretanje i provedbu strategije za poboljšanje održivog razvoja prometa. Isto tako, estimacija stanja prometa je jedan od osnovnih čimbenika drugih ITS usluga

poput predikcije vremena putovanja, predikcije stanja prometnog toka i izračuna optimalnih ruta za kretanje na prometnoj mreži, [6], [7].

1.1 Ciljevi i svrha rada

U ovom radu obrađeni su povijesni *Global Navigation Satellite System* (GNSS) podaci u svrhu izračuna mjere zagušenja (indeksa zagušenja). Indeks zagušenja predstavlja omjer različitih parametara koji pokazuju stanje prometnog toka u svrhu predikcije ili estimacije zagušenja. U svrhu izračuna indeksa zagušenja mogu se koristiti parametri poput prosječne brzine vozila, broja vozila u jedinici vremena, zasićenosti prometnog toka i dr.

Ciljevi rada su sljedeći:

- Prezentirati vrste i posljedice zagušenja;
- Opisati odabrane pokazatelje zagušenja;
- Napraviti estimaciju zagušenja na konkretnom primjeru urbane cestovne mreže koristeći dostupne GNSS podatke i dostupnu programsku podršku.

1.2 Dosadašnja istraživanja

Autori u [8] opisuju različite metode za detektiranje zagušenja. Prva metoda kojom se nastoji pokazati zagušenje zasnovana je na brzini putovanja, a druga metoda pokazuje indeks zagušenja pomoću zagušenosti prometnice. Dok treća metoda koristi kombinaciju različitih metoda gdje se gleda prosječna brzina vozila, efikasnost putovanja i omjer putovanja pri niskim brzinama s ukupnim vremenom putovanja. U radu [9] autori uspijevaju prikazati zone zagušenja u 24-satnom vremenskom intervalu. Za tu analizu koriste se prosječne brzine vozila, duljinu putovanja, te omjer vremena putovanja u zagušenju i ukupnog vremena putovanja. U istraživanju [10] prikazani su scenariji u rješavanju problema prometnog zagušenja u vršnim satima pomoću rješavanja problema usmjeravanja vozila (eng. *Vehicle Routing Problem* - VRP). To jest kako u uvjetima zagušenja pronaći rute u kojima je zagušenje manje ili ga nema za dolazak na odredište. Primjenom

ovih scenarija postiže se smanjenje vremena putovanja, povećanje sigurnosti i optimizacija prometnog toka.

1.3 Struktura rada

U prvom dijelu, UVOD, definiran je problem i predmet istraživanja, navedeni su ciljevi i svrha istraživanja, te je dan pregled dosadašnjih istraživanja u ovom području.

U drugom dijelu, OPIS STANJA PROMETA NA CESTOVNOJ PROMETNOJ MREŽI, definirane su posljedice i uzroci prometnog zagušenja, te vrste zagušenja.

U trećem dijelu, POKAZATELJI ZAGUŠENJA CESTOVNE PROMETNE MREŽE, opisani su glavni parametri prometnog toka kao i pokazatelji zagušenja, te posebno pokazatelji zagušenja zasnovani na brzini vozila.

U četvrtom dijelu, PRIMJENA POKRETNIH OSJETILA ZA ODREĐIVANJE STANJA PROMETNE MREŽE, opisana su osnovna pokretna osjetila za prikupljanja podataka, te njihova primjena u određivanju stanja prometnog toka. Najveći naglasak stavljen je na GNSS osjetila, odnosno podatke prikupljene pomoću ove tehnologije.

U petom dijelu, ESTIMACIJA RASPODJELE PROMETNOG ZAGUŠENJA: STUDIJA SLUČAJA NA PRIMJERU AUSTRIJSKOG GRADA DEUTSCHLANDSBERGA, opisana je provedena analiza, odnosno estimacija prometnog zagušenja u austrijskom gradu Deutschlandsbergu. Za estimaciju korištene su dvije metode kojima su prikazane vrijednosti zagušenja u 24-satnom intervalu.

2 OPIS STANJA PROMETA NA CESTOVNOJ PROMETNOJ MREŽI

Gradska dinamična područja primamljiva su za život velikom broju ljudi. Stoga se može pretpostaviti da će prometno zagušenje predstavljati jedan od osnovnih problema u takvim područjima zbog velikog broja vozila. Zagušenje se pojavljuje u raznim oblicima zbog čega je izazovno definirati samo jedan osnovni način mjerenja i rješavanja prometnog zagušenja.

Zagušenje ima uzročno-posljedični učinak na brzinu tijekom putovanja, odnosno na vrijeme trajanja putovanja. Jedna od poznatih definicija [11] navodi kako se zagušenje događa kada vozila počnu djelovati jedno na drugoga, zbog smanjenja brzine putovanja i u trenutku kada se na cestovnoj prometnici stanje približava svom kapacitetu. Posljedice zagušenja su vidljive kroz manje brzine vozila, uska grla koja nastaju zbog povećanog kapaciteta na dijelovima prometnica koja ne mogu podnijeti taj kapacitet, i povećanom vremenu putovanja i planiranju putovanja, [11], [12].

Prema [9], zagušenje se može jednostavno podijeliti na:

- Jako malo (eng. *Very Smooth*);
- Malo (eng. *Smooth*);
- Srednje (eng. *Mild Congestion*);
- Veliko (eng. *Heavy Congestion*).

2.1 Vrste i uzroci prometnog zagušenja

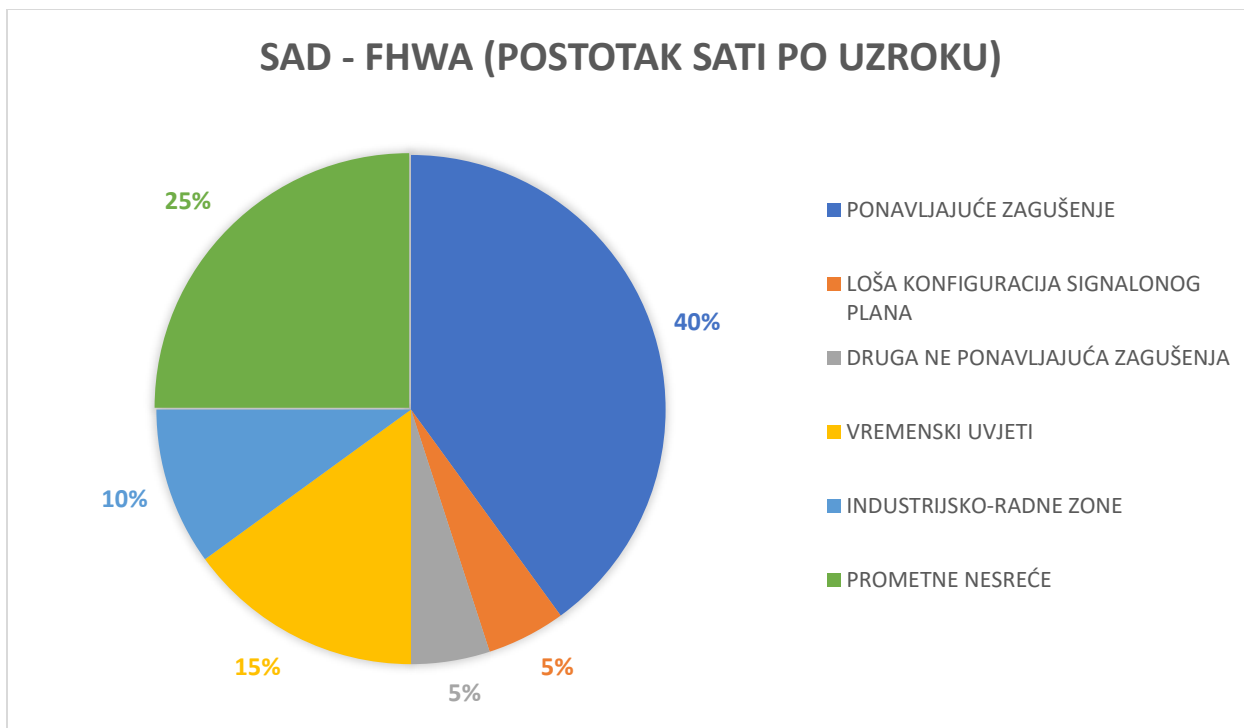
Prometno zagušenje može biti uzrokovano nizom parametara. Možda najjednostavnija podjela zagušenja bila bi na: ponavljajuća zagušenja (eng. *Recurrent*) i neponavljajuća (eng. *Non-recurrent*). Ponavljajuća zagušenja mogu se definirati kao zagušenja koja se ponavljaju zbog uzroka koji se događaju svakodnevno. Takvi uzroci su: dnevne migracije (posao, škola, itd.), dostave i sl. Dok uzroci neponavljajućih zagušenja su iznenadne pojave (prometne nesreće, prirodne nepogode, velika događanja i dr.) koje utječu na dio transportne mreže i zbog kojih se zagušenja događaju periodički i nasumično, i kao takva ne mogu se unaprijed planirati, [11].

Drugim riječima, ponavljajuća zagušenja su zapravo ona zagušenja koja je moguće predvidjeti kroz neki uzorak ponavljanja, a neponavljajuća zagušenja su ona zagušenja koja se događaju nasumice. Iako postoje i iznimke prema kojima se mogu predvidjeti i neka nasumična zagušenja poput radova na cesti ili sudara na kritičnim točkama, [11], [13].

Prometnom zagušenju najviše doprinose osobna vozila, infrastruktura gradskih prometnica (dizajn i održavanje) i vozačke navike. Naime, u prometu za definiranje zagušenja koristi se parametar PCU (eng. *Passenger Car Unit*). PCU odgovara omjeru vrste vozila i broja osoba koje se nalaze u vozilu. Osobno vozilo odgovara 1 PCU, dok recimo autobusi javnog prijevoza 3 PCU. Prema tome autobusi uzrokuju veće zagušenje nego osobna vozila zbog svoje veličine, odnosno prostora koji zauzimaju. No, ako se pogleda šira slika prosjek osoba koje se nalaze po jednom osobnom vozilu je 1.5, dok autobus može prevoziti i preko 50 osoba. Stoga, ako se u autobusu nalazi 50 osoba, osobni automobil uzrokuje zapravo 11 puta veće zagušenje nego autobus, [14].

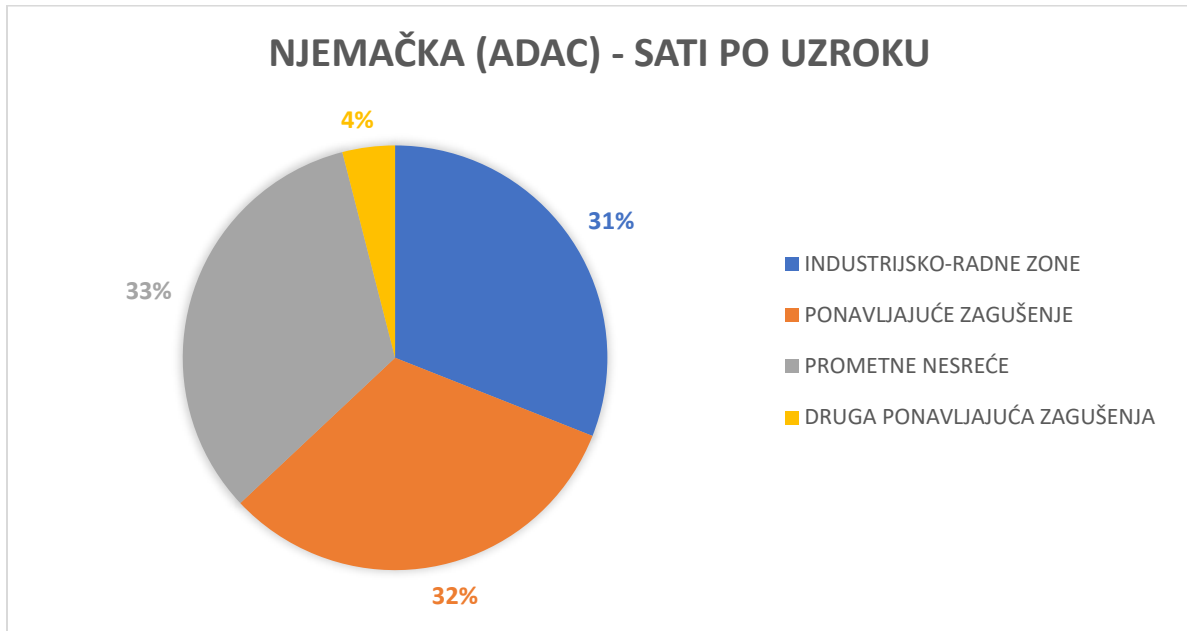
Prometna infrastruktura često zna biti neodgovarajuća svim prometnim potražnjama, ponajviše kod gradskih prometnica. Razlog je tomu obično prostor kojeg u velikim Europskim gradovima ima jako malo. Prometnice su često preuske ili npr. autobusne stanice oduzimaju dio prometnice. U gradovima gdje su velike količine kiše, usporenje prometnog toka često se događa i zbog lošeg održavanja prometnice, odnosno odvodi vode s prometnice ne mogu odgovoriti velikoj količini kiše, [15].

U omjer na ukupan broj svih zagušenja 40% zagušenja u Americi su zapravo ponavljajuća zagušenja, Grafikon 1. No, isto tako vidljivo je da 60% svih zagušenja uzrokovana nekim od oblika neponavljajućeg zagušenja, [11].

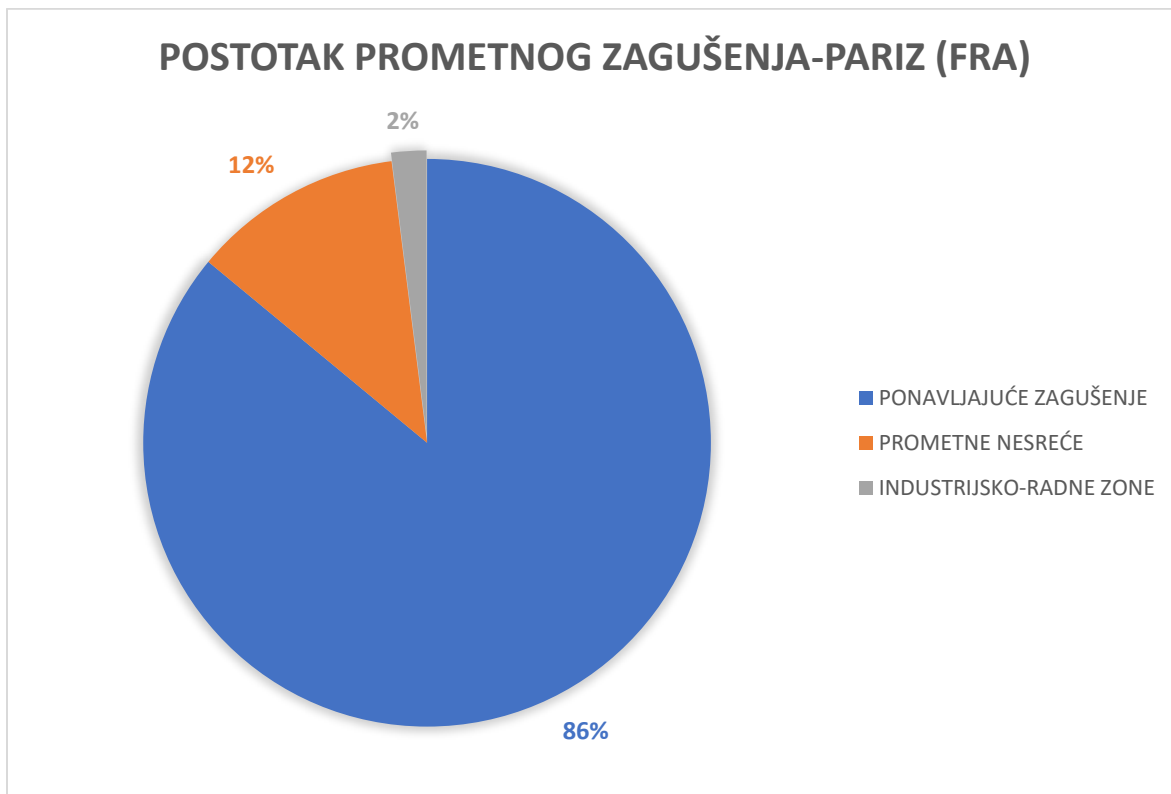


Grafikon 1. Postotak prometnog zagušenja po uzrocima prometnog zagušenja - SAD

Dok je u Americi polovica zagušenja neponavljajuća, u Europi, odnosno u Njemačkoj može se vidjeti da preko 60% svih zagušenja su ponavljajuća, a u Parizu čak 86% (Grafikon 2, Grafikon 3). Uzroci tomu mogu biti razni, ali možda ponajviše uzrok su površinom manje prometnice i veliki broj vozila koji se kreće svaki dan istim rutama, [11].



Grafikon 2. Postotak zagušenja po uzroku zagušenja - Njemačka



Grafikon 3. Postotak prometnog zagušenja – Pariz

2.2 Vrste prometnog zagušenja

2.2.1 Ponavljajuća zagušenja

Ponavljajuće zagušenje nastaje zbog uzoraka koji se ponavljaju periodično, kao npr. svakodnevna putovanja na posao. Za ponavljajuće zagušenje često se vežu i uska grla. Uska grla su zapravo dionice na prometnici gdje se pojavljuju najveća zagušenja, odnosno to su fizička ili operacijska ograničenja prometnice gdje se kapacitet prometnice smanjuje i gdje u vršnim satima dolazi do zagušenja, [13].

2.2.1.1 Ponavljajuća zagušenja uzrokovana periodičnim obrascima

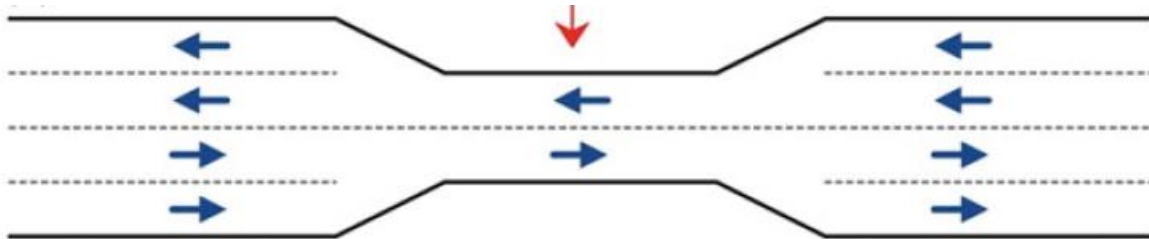
Utjecaj različitih obrazaca koji se ponavljaju svakodnevno vidljiv je kroz ponavljajuća zagušenja. Naime, prometna zagušenja koja se javljaju svakodnevno u jutarnjim ili popodnevnim satima kada veliki broj ljudi putuje na posao ili s posla (dnevne migracije) se kategoriziraju kao ponavljajuće zagušenje, [11].

Također, ponavljajuće zagušenje može se detektirati pomoću prometnog toka. Vozila koja se kreću u istom smjeru uzrokuju neprekidni prometni tok. Dok, npr. u gradovima gdje se nalazi veliki broj raskrižja i vozila koja nastoje koristiti istu prometnu infrastrukturu (u istom vremenskom trenutku) možemo nazvati kao privremeno prekinuti prometni tok. Svakodnevne migracije koje se vrše u jutarnjim i popodnevnim satima uzrokuju privremeno prekinuti prometni tok, [16].

2.2.1.2 Fizička uska grla

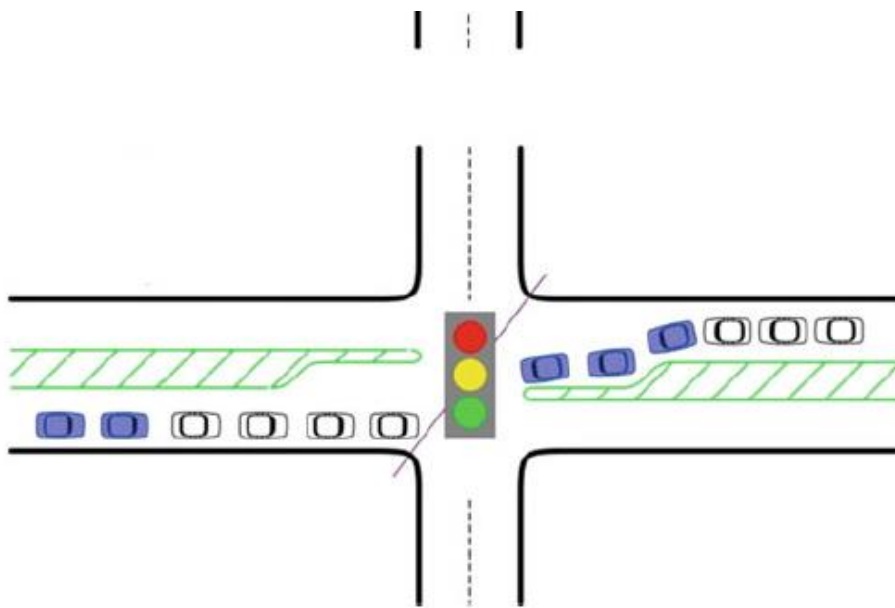
Fizička uska grla pojavljuju se kada postoje, [13]:

- a) nejednakosti kod prometnih traka (eng. *Lane Imbalance*) – mjesta gdje se više traka spajaju u jednu (mostovi, tuneli i sl.), Slika 1;



Slika 1. Usko grlo pri fizičkom smanjenju prometnice

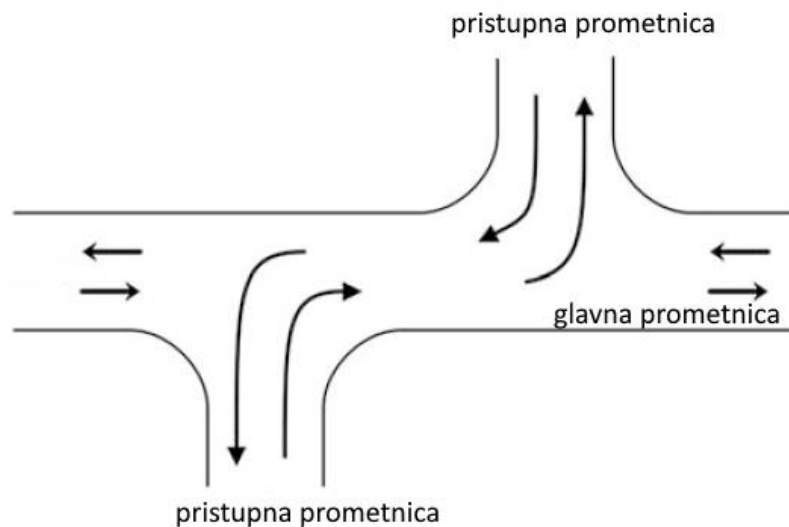
- b) reljefna ograničenja (eng. *Geometric Constrains*) – nizbrdice s velikim nagibom, uske trake, oštre krivine i dr.;
- c) kratke pomoćne trake (eng. *Short Auxiliary Lanes*) – pomoćne trake koje se nalaze na semaforiziranim raskrižjima za skretanje ulijevo ili udesno, Slika 2;



Slika 2. Uska grla kod skretanja s kratkim trakama za skretanje

- d) neadekvatan broj pristupnih cesta (eng. *Inadequate Access Control*) – previše pristupnih cesta na malom prostoru, gdje se vozila kreću primjerice iz garaža ili parkinga;

- e) loša geometrija pristupnih cesta – odnosno pristupne ceste nisu na adekvatan način izgrađene, što dovodi do povećanog zagušenja i povećanja rizika za nesreće;
- f) raskrižja s više privoza (eng. *Multi-leg Intersection*) – npr. raskrižja koja imaju 6 privoza;
- g) raskrižja koja nisu okomita (eng. *Offset Intersection*), Slika 3;



Slika 3. Raskrižje s izmaknutim sporednim privozima

- h) pristupne i odlazne ceste s prometnice na kojoj se vrši naplata cestarine – stvaranje zagušenja zbog velikog broja vozila koja se žele uključiti u promet na glavnoj prometnici;
- i) mostovi koji se pomiču (eng. *Moveable Bridge Openings*) – mostovi koji imaju mogućnost podizanja kako bi omogućili prolazak većim brodovima;
- j) i željeznički prijelazi (eng. *Railroad Grade Crossing*) – prijelazi unutar gradova često znaju potpuno zaustaviti promet.

2.2.1.3 Operacijska uska grla

Uz fizička uska grla za ponavljajuća zagušenja vežu se i operacijska uska grla, tj. to su zapravo zagušenja koja se javljaju kod raskrižja i na središtima prometnice.

Ova uska grla najčešće se javljaju u vršnim satima i to zbog parkiranja na rubovima prometnice, dostavnih vozila koja znaju stajati na prometnici, kao i velikog broja pješaka u gospodarskim zonama, [13], [14].

Prema tome operacijska uska grla možemo podijeliti prema uzrocima na, [13]:

- a) parkiranje i dostavna vozila – u skoro svakom dijelu grada u jutarnjim vršnim satima često se mogu vidjeti dostavna vozila koja su parkirana na sredini prometnice, i to zbog nedostatka parkirnih površina za utovar-istovar robe i sl. Isto tako zbog manjka parkirnih mjesta u gradovima dozvoljava se parkiranje na rubovima prometnice;
- b) konflikti kod raskrižja – u vršnim satima veliki broj pješaka, biciklista, osobnih vozila, teretnih i dostavnih vozila se nalazi na istom raskrižju što uzrokuje jako veliko zagušenje;
- c) semaforizirana raskrižja – uzrok uskog grla može biti lokacija, faze i dužina signalnog plana (lijevi skretači, konflikti desnih skretača s velikim brojem pješaka i sl.).

2.2.2 Neponavljajuća zagušenja

Uzroci neponavljajućih zagušenja su zapravo slučajni događaji koje je u većini slučajeva ne moguće predvidjeti. Ipak postoje i uzroci za koje je moguće predvidjeti zagušenje - usko grlo. Takve slučajeve vežemo uglavnom uz sportske i glazbene događaje, privremene radove na prometnici i druge događaje koje okupljaju veliki broj ljudi na jednom mjestu. Duljina trajanja jednog ovakvog događaja uzrokuje i duljinu trajanja uskog grla odnosno oporavka prometnog toka, [13].

2.2.2.1 Prometni incidenti i utjecaji prirodnih nepogoda na zagušenje

Incidentna situacija u prometu dovodi do pojave zasićenja kapaciteta prometnice ili do naglog povećanja potražnje. Incidentne situacije se općenito dijele na primarne i sekundarne. Sekundarni incidenti su oni koji su uzrokovani primarnim (oko 20% svih incidenata su sekundarne prirode), [17]. Jedna od najvidljivijih posljedica incidentne situacije i uskog grla je smanjenje brzine.

Isto tako kiša može smanjiti brzinu i do 20% na prometnici, a lagani snijeg čak do 30% naspram brzine u normalnim uvjetima. Dok jako grmljavinsko nevrijeme može dovesti i do 50% pada brzine, Tablica 1, [15].

Tablica 1. Utjecaj različitih vremenskih promjena na brzinu

Vremenski utjecaj	Promatrane brzine (km/h)	Postotak smanjenja brzine
normalni uvjeti	103	1
rominjanje	82	0.8
lagana kiša	80	0.8
lagani snijeg	72	0.7
kiša	77	0.8
susnježica	60	0.6
snijeg	60	0.6
olujna kiša	85	0.8
grmljavinsko nevrijeme	76	0.7
jako grmljavinsko nevrijeme	45	0.5

Kako bi se što lakše riješila incidentna situacija sam proces se može podijeliti u 5 faza, [18]:

- detekcija incidente situacije;
- verifikacija incidentne situacije;
- odgovor na incidentnu situaciju;
- raščišćavanje incidentne situacije;
- i normalizacija prometnog toka.

2.2.2.2 Nagli porasti prometne potražnje

U dijelovima grada gdje se nalaze veliki sportski centri poput stadiona (ili drugi sportski objekti), često se događa nagli porast prometne potražnje. Porast se obično događa zbog velikog broja ljudi koji nastoji osobnim vozilima doći do sportskog centra.

U isto vrijeme dolazi i do porasta pješaćkog prometa što može dovesti do prometnog kolapsa. Radovi na cesti i privremena zatvaranja prometnice isto tako dovode i do smanjenja kapaciteta prometnice, što dovodi do pada brzine vozila na dijelu ili cijeloj prometnoj mreži, [11], [13].

2.2.2.3 Ponašanje vozača

Promatranje ponašanja vozača u posljednje vrijeme pronalazi svoju svrhu i u organizaciji flote vozila. Razlog tomu su drugačiji uzorci ponašanja kod pojedinog vozača, koji određenim postupcima mogu doprinijeti većoj potrošnji goriva ili incidentima, koji na kraju dovode do većih troškova flote vozila. Stoga se ponašanje vozača uzima i u studijama analize rizika.

Nepredvidive i neprilagođene reakcije vozača mogu dovesti do smanjenja brzine cijelom nizu vozila koji se nalaze iza njega. U vremenu vršnog opterećenja takve reakcije dovode do zagušenja prometnog toka. Jedan od primjera je kada u traci za prestizanje vozač vozi premalom brzinom. Takvim postupkom usporava sav promet iza sebe u svim trakama. Isto tako do zagušenja dovodi i stajanje dostavnih vozila i autobusa (ili taksija) na prometnicama koje nemaju ugibaldište. Još jedan primjer gdje vozači utječu na prometni tok je kada usporavaju kod lokacije gdje se dogodio prometni incident iako imaju mogućnost nastaviti vožnju u normaliziranim uvjetima, [11], [13].

2.3 Posljedice prometnog zagušenja

Utjecaji prometnog zagušenja mogu biti razni. Oni direktni utjecaji vidljivi su na prometnicama. Povećanje repova čekanja, povećanje vremena putovanja, smanjenje prosječne brzine putovanja, zasićenje prometnog toka samo su neki od pokazatelja koji mogu dati uvid u prometno zagušenje. Indirektni, odnosno, vanjski utjecaji prometnog zagušenja su oni utjecaji koji djeluju na ljude, okoliš, gospodarstvo i dr.

Jedna od podjela posljedica prometnog zagušenja se može kategorizirati kao: posljedice vezane za vozilo, ljude i gospodarstvo (Tablica 2). Primjerice povećana potrošnja goriva može utjecati i na socijalni i ekološki aspekt, ali isto tako i na gospodarstveni (npr. vozni park tvrtke), [11].

Tablica 2. Posljedice prometnog zagušenja

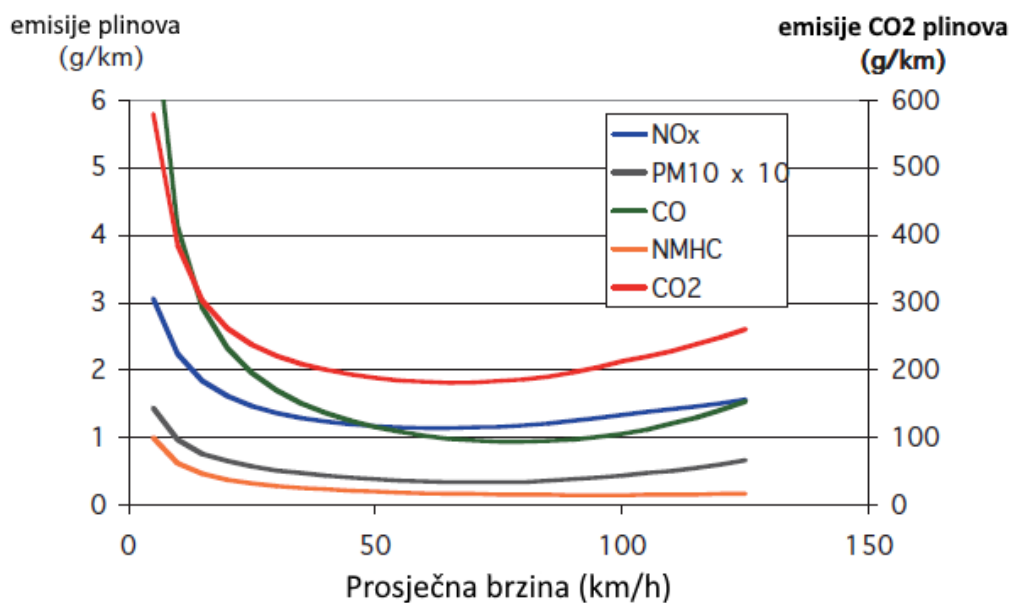
Posljedice vezane za vozilo	Posljedice vezane za ljude i okoliš	Posljedice vezane za gospodarstvo
Povećanje potrošnje goriva	Osobne štete – zbog povećanja prometnih nesreća	Povećanje vremena putovanja dobara (dostavna vozila i sl.)
Povećanje amortizacije vozila	Zagađenje okoliša	Gubitak profitabilnosti – za zaposlenike
Fizička oštećenja vozila – povećanje broja prometnih incidenata	Povećanje buke	
	Stres	
	Povećanje vremena putovanja (po osobi)	
	Nepouzdanost i manjak točnosti - putovanja	

2.3.1 Posljedice vezane za vozilo

Potrošnja goriva i emisija ispušnih plinova ovise o prosječnoj brzini vozila na prometnici. Nadalje, veća učestalost zagušenja ima za posljedicu da vozila više vremena provode na prometnicama što povećava troškove održavanja vozila.

Isto tako, padom prosječne brzine zbog prometnog zagušenja vozila mogu ispuštati više plinova koji zagađuju okoliš. Većina ovih štetnih plinova najmanja je pri tzv. srednjim prosječnim brzinama.

Najznačajniji ispušni plin u ovom skupu je CO₂, koji je prikazan crvenom krivuljom, Slika 4. Vidljivo je da smanjenjem ili povećanjem prosječne brzine količina svih ispušnih plinova se povećava, [11].



Slika 4. Emisije ispušnih plinova u Ujedinjenom Kraljevstvu – 2005

2.3.2 Posljedice vezane za gospodarstvo

Utjecaj prometnog zagušenja na gospodarstvo vidljiv je iz nekih osnovnih čimbenika poput povećane potrošnje goriva ili kašnjenja dobara prilikom dostava. No, njegov utjecaj je zapravo puno širi. Prometno zagušenje, primjerice, može uzrokovati gubitak u cijelom nizu segmenata logističkog lanca. Od toga da roba kasni na svoje odredište cijeli logistički lanac ima gubitke. Iako je zapravo jako teško definirati i mjeriti na što sve utječe prometno zagušenje u gospodarstvu, jedna od podjela je česta, [11]:

- utjecaji na procese vezane za logistički lanac i druge poslovno-gospodarske procese;
- utjecaji na tržište i na dostupnost dobara ili usluga;
- troškovi firme za putovanje radnika.

Zagušenje ima utjecaj na sve dijelove logističkog lanca. Skladišta ili vozila uvelike ovise o planiranju i točnosti vremena isporuke dobara. Zagušenje utječe na dostavne procese poput *just-in-time* koji je poznat kao brz i točan proces dostave robe. Ako je zagušenje veliko cijeli logistički lanac *just-in-time* procesa kasni i pouzdanost samog procesa opada.

Problemi se javljaju i kod tzv. „običnih dostava“. Ako dostavljač ne uspije dostaviti paket u određenom vremenskom intervalu koji je dogovoren, dostava se obično odgađa za 24 sata. To utječe i na dostavljača, ali i na primatelja i pošiljatelja paketa, [11], [13].

No, ako se pogledaju brojke u istraživanju uzroka kašnjenja u sektoru dostave hrane u Ujedinjenom Kraljevstvu, prometno zagušenje uzrok je skoro trećine kašnjenja. Unatoč tomu većina firmi ima već razrađen sustav kako se boriti protiv zagušenje, odnosno na koji način regulirati probleme oko pouzdanosti i kašnjenja vremena dostave. Takvi sustavi se zasnivaju na predikcijama zagušenja u vremenskim intervalima u danu, [19].

Područja gradova su poprilično produktivna. Produktivnost je povezana za činjenicu da su svakome pojedincu lako dostupni drugi pojedinci, usluge i poslovi. Različita istraživanja pokazuju da zagušenja u prometu imaju utjecaj na premještaj velikih firmi iz središta gradskog područja u prigradska područja. Takvim postupkom produktivnost gradskog područja se smanjuje, s obzirom na činjenicu da se pojedincu smanjuje dostupnost drugih pojedinaca, poslova i usluga. Tvrtke koje imaju zaposlenike koji cijene život u gradskom području ne mogu lako donijeti odluku o premještanju tvrtke u predgrađe. Stoga, tvrtka odnosno uprava tvrtke mora donijeti vrlo racionalnu odluku temeljenu na količini zagušenja, produktivnosti, održavanju kvalitete rada i zadovoljstva zaposlenika, [11].

Izmicanje firme u područja izvan gradske sredine dovodi i do većeg troška prilikom putovanja zaposlenika. Trošak za firme koje financiraju prijevoz putnika povećava se i zbog udaljenosti, ali i zbog dužeg vremena putovanja. Prometnim zagušenjem povećava se i vrijeme putovanja, [11].

2.3.3 Posljedice vezane za čovjeka i okoliš

Svakodnevna zagušenja imaju značajan utjecaj na okoliš i stanovništvo. Zagađenje ispušnim plinovima iz vozila, povećanje buke, ali i stres imaju utjecaja na ljudsku psihu. Ove posljedice zapravo se mogu definirati i kao povećana ukupna potrošnja energije.

Zagađenje zraka trenutno jedan je od najčešćih pokazatelja zagađenja okoliša. Plinovi koji uzrokuju zagađenje su, [11]:

- sumporov (IV) oksid (SO_2) – ima utjecaj na ljudsko zdravlje i jedan je od uzroka kiselih kiša;
- dušikovi oksidi (NO_x) – imaju utjecaj na ljudsko zdravlje i raznu vegetaciju, stvaranje ozona i sl.;
- hlapivi organski spojevi (VOC);
- lebdeće čestice PM (eng. *Particulate Matters*) – čestice koje se sastoje od raznih kemijskih spojeva, i imaju utjecaj na ljudsko zdravlje i okoliš;
- i ugljični monoksidi (CO) – utjecaj na ljudsko zdravlje.

Buka u velikim gradovima u najvećoj mjeri se stvara zbog prometa. Veliki broj vozila, ali i prometno zagušenje, često stvaraju buku koja izaziva stres i nelagodu stanovnicima pored prometnica. Zapravo, buka utječe na direktnu kvalitetu života u gradu. Izvor buke u vozilima je motor i kretanje vozila (trenje gume na prometnici).

Posljedice koje su izazvane bukom u prometu većinom se vežu za izazivanje stresa kod ljudi. Prema novijim istraživanjima utjecaj buke ogleda se i u kardiovaskularnim i respiratornim problemima, utjecaju na živčani sustav i dr., [11].

Sve posljedice prometnog zagušenja na neki način imaju utjecaj na stvaranje stresa kod ljudi. Stres se definira kao psihološka, emotivna i kognitivna reakcija na „stresore“ (koji se definiraju kao podražaji koji blokiraju neki cilj). U prometu npr. cilj je dolazak na destinaciju na vrijeme bez kašnjenja. Ako se dogodi prometno zagušenje na ruti koja vodi do destinacije to dovodi do kašnjenja, a kašnjenje vrlo često dovodi do stresa, [11].

Stvaranje stresa uzrokuje razne poremećaje u ponašanju vozača tijekom putovanja (agresivna vožnja), ali često dovodi i do prometnih prekršaja i u krajnjem slučaju prometnih incidenata.

Sigurnost putnika u prometu ovisi i o prometnom zagušenju. Povećanje broja prometnih incidenata i povećanja osobne štete putnika, samo su od nekih utjecaja zagušenja. Prometni incidenti u stanjima zagušenjima obično se događaju pri malim brzinama, što rezultira s manjim posljedicama i u većini slučajeva bez smrtonosnih slučajeva, [11].

Sve ove posljedice utječu na pouzdanost vremena putovanja, odnosno njegovog planiranja i povećanja trajanja putovanja. Utjecaj zagušenja na vrijeme putovanja ovisi o duljini putovanja. Gustoća naseljenosti, veličina gradskog područja i razvijenost područja (ekonomska, gospodarska, prometna i dr.) utječu na duljinu putovanja, [13], [14].

Pouzdanost vremena putovanja prema mnogim istraživanjima pokazala se više značajnom nego samo prosječno trajanje putovanja. Pouzdanost se pokazala putnicima kao značajan čimbenik prilikom putovanja, te i prilikom planiranja putovanja igra značajnu ulogu za gospodarstvo (npr. dostavna vozila).

Na vrijeme putovanja utječu, [11]:

- količina prometne potražnje – povećanjem prometa povećava se i volumen potražnje i obratno;
- prometni incidenti;
- radovi na prometnici;
- vremenski uvjeti – smanjenje brzine;
- ponašanje vozača;
- i ostali događaji koji se pojavljuju u vremenima vršnog opterećenja.

3 POKAZATELJI ZAGUŠENJA CESTOVNE PROMETNE MREŽE

Kada se govori o prometnom zagušenju, u uporabi su dva pristupa po kojima se može mjeriti zagušenje, [11]:

- operacijski (inženjerski) pristup – indikatori poput brzine, prometnog toka, zagušenja, repovi čekanja i sl.;
- ekonomski pristup – eksploatiranje fizičkih mjera u novčane vrijednosti koje se mogu koristiti u analizama poput analize troškova i koristi (eng. *cost-benefit*).

Na osnovu ovoga može se zaključiti zapravo da inženjeri žele pridonijeti tome da prometnica koja se gradi bude maksimalno optimizirana što se tiče prometnog toka, a ekonomistima je u cilju isplativost prometnice. Problemi koji se mogu vezati uz prometno zagušenje i ova dva različita pristupa obično se javljaju kada investitor (privatna osoba, grad, država, itd.) bira rješenje koje je financijski isplativije naspram rješenja koje ima kvalitetniju prometnu sliku (prometni tok bez zagušenja), [11].

3.1 Osnovni parametri prometnog toka

Prometni tok je istovremeno kretanje više vozila na putu u određenom poretku. Za definiranje stanja u prometu (prometnici, dionici, mreži) koriste se razni parametri koji se nazivaju parametri prometnog toka.

Osnovni parametri ili indikatori prometnog toka mogu se svrstati u 5 glavnih kategorija, [16]:

- protok vozila;
- gustoća prometnog toka;
- brzina prometnog toka;
- interval slijeđenja vozila;
- razmak u slijeđenju vozila.

U nastavku su navedene definicije osnovnih parametara prometnog toka koje su preuzete iz literature [16].

Protok vozila (q) je broj vozila koja prođu kroz promatrani presjek prometnice u jedinici vremena u jednom smjeru za jednosmjerne prometnice ili u oba smjera za dvosmjerne prometnice. U odnosu na način promatranja protok vozila može se podijeliti: protok vozila na presjeku i protok vozila na dionici, [16].

„Gustoća prometnog toka (g) podrazumijeva broj vozila na jedinicu duljine prometnice, po prometnoj traci, po smjerovima za jednosmjerne prometnice, odnosno u oba smjera za dvosmjerne prometnice. Pojam gustoće vezan je prostorno za odsjek ili prometnu dionicu, a vremenski za trenutno stanje“, [16].

„Pod pojmom brzine toka misli se na određenu srednju vrijednost brzina svih vozila koja sudjeluju u promatranom prometnom toku. Ovisno o načinu promatranja protoka u odnosu na prostor i vrijeme, a obzirom i na značenja pojmova protoka vozila i gustoće, brzinu prometnog toka dijelimo na, [16]:

- srednja prostorna brzina toka, koja je analogno gustoći prostorno vezana za odsjek puta (S), a vremenski za trenutak;
- srednja vremenska brzina toka, koja je analogno protoku vozila prostorno vezana za presjek puta, a vremenski za period promatranja (T).“

„Interval slijeđenja vozila (t_h) prometnom toku je vrijeme između prolaska dva uzastopna vozila kroz zamišljeni presjek promatranog dijela puta“, [16].

„Razmak slijeđenja vozila (S_h) predstavlja prostorni razmak između dva uzastopna vozila u prometnom toku, a izražava u metrima. Sa stajališta realnih prometnih tokova na odsjeku puta razmak u praćenju predstavlja srednju vrijednost svih razmaka praćenja između uzastopnih vozila u određenom toku na promatranom odsjeku ili dionici puta“, [16].

3.2 Pokazatelji prometnog zagušenja

Pokazatelji prometnog zagušenja mogu se podijeliti u 7 kategorija, Tablica 3, [13].

Tablica 3. Pokazatelji prometnog zagušenja

NAZIV	PRIMJERI
Indikatori zasnovani na brzini vozila	prosječna brzina vozila
Privremeni ili indikator kašnjenja	prosječno vrijeme putovanja korisnika prometne mreže, predviđeno vrijeme putovanja
Prostorni indikatori	dužina prometnice pod prometnim zagušenjem (u kilometrima)
Indikatori zasnovani na razini usluznosti	razina usluznosti LOS (eng. Level of Service)
Indikatori pouzdanosti	indeks planiranja vremena putovanja
Ekonomski indikatori	godišnji troškovi uzrokovani zagušenjem, eksterni troškovi uzrokovani zagušenjem
Drugi	dotatna potrošnja goriva uzrokovana zagušenjem

Kao tri najrealnija pokazatelja prilikom predikcije i analize zagušenja mogu se izdvojiti, [13]:

- vrijeme putovanja – prosječna brzina putovanja na mreži, ruti, dionici i dr.;
- kvaliteta putovanja;
- utjecaj prometnog zagušenja u vršnom opterećenju na korisnike prometne mreže – omjer broja korisnika na prometnici sa zagušenjem naspram ukupnog broja korisnika prometne mreže.

3.3 Pokazatelji prometnog zagušenja zasnovani na brzini

Indeksi, odnosno pokazatelji prometnog zagušenja, koji su zasnovani na brzini vozila, mogu se različito interpretirati. Brzina vozila koja se promatra u ovom slučaju najčešće se prikuplja pokretnim osjetilima, odnosno GNSS podacima. Uređaji koji u sebi imaju ugrađen GNSS sustav imaju mogućnost prikupiti podatke o brzini kretanja, smjeru kretanja, visini na kojoj se vozilo nalazi i ostalo, [13], [20].

Indikatori zasnovani na brzini zapravo su indikatori koji se koriste i u ovome radu kao osnovni pokazatelji indeksa prometnog zagušenja. Prosječna brzina vozila tijekom zagušenja može dati vrlo brz, ali i ne najtočniji, uvid u to da li je neka prometnica u određenom vremenskom intervalu zagušena ili ne. Relativno smanjenje brzine (eng. *Relative Speed Reduction*) je koeficijent koji prikazuje smanjenje brzine na linkovima u odnosu na referentnu, [20]:

$$RSR_i = \frac{S_i^{ref} - S_i^{obs}}{S_i^{ref}} [\%] \quad (3.2)$$

gdje je RSR_i koeficijent smanjenja brzine na linku i , S_i^{ref} referentna brzina, a S_i^{obs} izmjerena brzina na i -tom linku za vrijeme promatranog perioda.

Referentna brzina se različito definira. Za referentnu brzinu može se uzeti 85% brzine izmjerene noću, maksimalna brzina na ruti, maksimalna dozvoljena brzina kretanja na prometnici, i dr.

Dok relativni pad brzine na mreži (eng. *Relative Network Level Speed Reduction Indicator*) je zapravo omjer svih referentnih brzina na mreži i izmjerenih brzina na mreži, [20]:

$$RSR_L = \frac{(S_{NET})^{ref} - (S_{NET})^{obs}}{(S_{NET})^{ref}} [\%] \quad (3.3)$$

gdje je RSR_L relativni pad brzine na mreži, $(S_{NET})^{ref}$ referentna brzina na mreži i $(S_{NET})^{obs}$ izmjerena ili procijenjena brzina na mreži.

4 PRIMJENA POKRETNIH OSJETILA ZA ODREĐIVANJE STANJA PROMETNE MREŽE

4.1 Obrada podataka i određivanje stanja prometne mreže

Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu pomoću FCD pokretnih osjetila omogućilo je raznolikiju primjenu prilikom analiziranja prometnog toka. Trenutno sve veći broj vozila u sebi sadrži FCD osjetila što omogućava da ova tehnologija postane jedna od najviše korištenih prilikom raznih analiza prometa. Razlog tomu je velika raširenost i manji troškovi prilikom prikupljanja i obrade podataka. Analiza prometnica unutar gradske prometne mreže obično se zasniva na FCD podacima (zbog količine podataka) u kombinaciji s drugim načinima prikupljanja (induktivne petlje, kamere i sl.). Estimacija profila brzina osnovni je oblik primjene FCD tehnologije, gdje se pomoću npr. prosječne brzine vozila može odrediti zagušenje na dionici ili mreži, [20].

Podaci koje šalju vozila koja posjeduju uređaj s FCD tehnologijom su identifikacijska oznaka vozila (ID vozila), prostorna pozicija (koordinate – zemljopisna dužina i širina) i vremenski trenutak zabilježene prostorne pozicije.

U većini slučajeva FCD tehnologija, odnosno GNSS sustav omogućava i prikupljanje podataka o brzini vozila, smjeru kretanja i visini. Podaci se šalju kroz dogovoreni protokol koji sadrži sintaksu i semantiku informacije, i pravila za razmjenu informacije. Zapisi koji se šalju s GNSS tehnologijom najčešće se šalju pomoću NMEA i GPX protokola, [20], [21].

4.2 Pokretna osjetila zasnovana na GNSS tehnologiji

Podaci koji se prikupljaju s pokretnim osjetilima, odnosno pomoću GNSS (Globalni navigacijski satelitski sustavi) tehnologije, imaju razne primjene. Za pokretna osjetila FCD zapravo glavna stavka pri primjeni je poznavanje lokacije vozila. Ako se pozicija određuje pomoću pametnog telefona poznat je naziv FPD (eng. *Floating Phone Data*), [20].

Naime, GNSS sustav objedinjuje sve navigacijske sustave koji pokrivaju cijelu planetu Zemlju, [22]:

- Globalni navigacijski sustav GPS (eng. *Global Positioning System*) – američki sustav razvijen 1990-ih godina od strane američke vojske za vojne potrebe;
- GALILEO – projekt Europske unije za uspostavljanje upotrebljivog europskog navigacijskog sustava;
- GLONAS (rus. *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) – ruski navigacijski satelitski sustav;
- BDS (eng. *BeiDou Navigation Satellite System*) – kineski navigacijski sustav.

Efikasnost GNSS sustava mjeri se kroz, [22]:

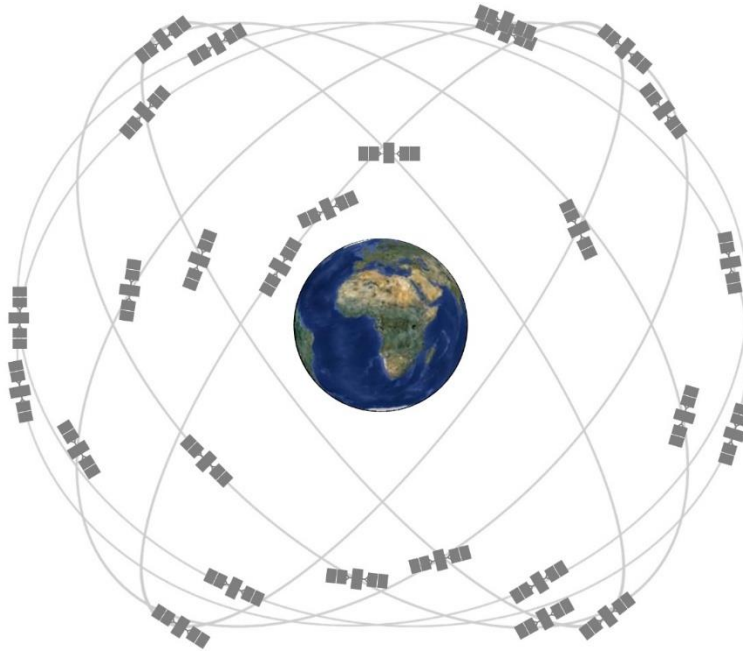
1. Preciznost – razlika između izmjenog i stvarnog položaja vozila;
2. Integritet – mogućnost sustava da osigura prag pouzdanosti, i da u uvjetima anomalija pošalje alarm;
3. Kontinuitet – mogućnost sustava da radi bez prekida;
4. Dostupnost – postotak vremena u kojima je sustav uspio ispuniti preciznost, integritet i kontinuitet.

4.2.1 GPS sustav

GPS sustav sastoji se od segmenata koji u svakom trenutku moraju raditi kako bi se dobila točna pozicija terminalnog uređaja. Tri cjeline koje čine GPS su, [21]:

- svemirski segment - to su zapravo sateliti koje kruže u orbitama oko Zemlje (sastoji se od 24 satelita koji kruže u 6 orbita), Slika 5;
- kontrolni segment – ovaj segment čine stanice koje su raspodijeljene po cijelom svijetu, a glavna stanica koja prikuplja podatke sa svih ostalih nalazi se u Coloradu (USA). Podaci koji se šalju zapravo su podaci o korekcijama vremena;
- korisnički segment - to su zapravo uređaju koji posjeduju GPS prijemnike, ovaj segment se dijeli na autorizirane korisnike – američka vojska i državne službe –, i na neautorizirani segment – svi civilni korisnici.

Određivanje pozicije GNSS, odnosno GPS sustava vrši se tako da se mjeri vrijeme proteklo od emitiranja signala sa satelita do primanja signala na prijemniku (terminalnom uređaju). Za postizanje točne pozicije potrebna je precizna usklađenost satova na prijemniku i satelitu. Kako bi GPS prijemnik odredio svoju poziciju potrebno je da izmjeri udaljenost do satelita, da poznaje poziciju satelita i da sadrži podatke za računanje korekcija, [20], [23].



Slika 5. Raspored satelita po orbitalnim ravninama kod GPS sustava

Prvu vrijednost, odnosno udaljenost prijemnika (R) od satelita računa prema, [21]:

$$R = c * \Delta t = c * (t_s - t_p) \quad (4.1)$$

gdje je c brzina svjetlosti, t_s pokazivanje satelitskog sata, a t_p pokazivanje sata u prijemniku.

Druga vrijednost, koja je potrebna kako bi se odredila pozicija prijemnika, je da prijemnik poznaje poziciju satelita, [21]:

$$\sqrt{(x_{si} - x_p)^2 + (y_{si} - y_p)^2 + (z_{si} - z_p)^2} = c * (t_s - t_p) \quad (4.2)$$

gdje su x , y i z koordinate satelita. Podaci o koordinatama satelita sadržani su u porukama koje satelit šalje prema prijemniku. Najmanje su potrebna tri satelita u savršenim uvjetima da bi se lokacija točno izmjerila.

Ali, ipak u teoriji ovo nisu dovoljne vrijednosti kako bi se dobila točna pozicija prijemnika, zato što radiosignal ne putuje brzinom svjetlosti zbog raznih vanjskih utjecaja, i to dovodi do nesavršenosti satova i na satelitu i na prijamniku. Zbog toga potrebno je odrediti tzv. pseudorazmak R^* koji u obzir uzima i pogrešku kod širenja radiovalova, [21]:

$$R^* = R + c * (\Delta t_p - \Delta t_{si}) + c * \Delta t_{ai} \quad (4.3)$$

gdje su Δt_p i Δt_{si} odstupanja sata u prijamniku i sata na satelitu od vremena sustava, a Δt_{ai} je pogreška zbog utjecaja na širenje radiovalova. Kako postoji pogreška koje se uračunava, u praksi potrebna su 4 satelita kako bi se dobila precizna lokacija prijemnika, [21].

Pogreške se mogu kategorizirati po segmentima, [21]:

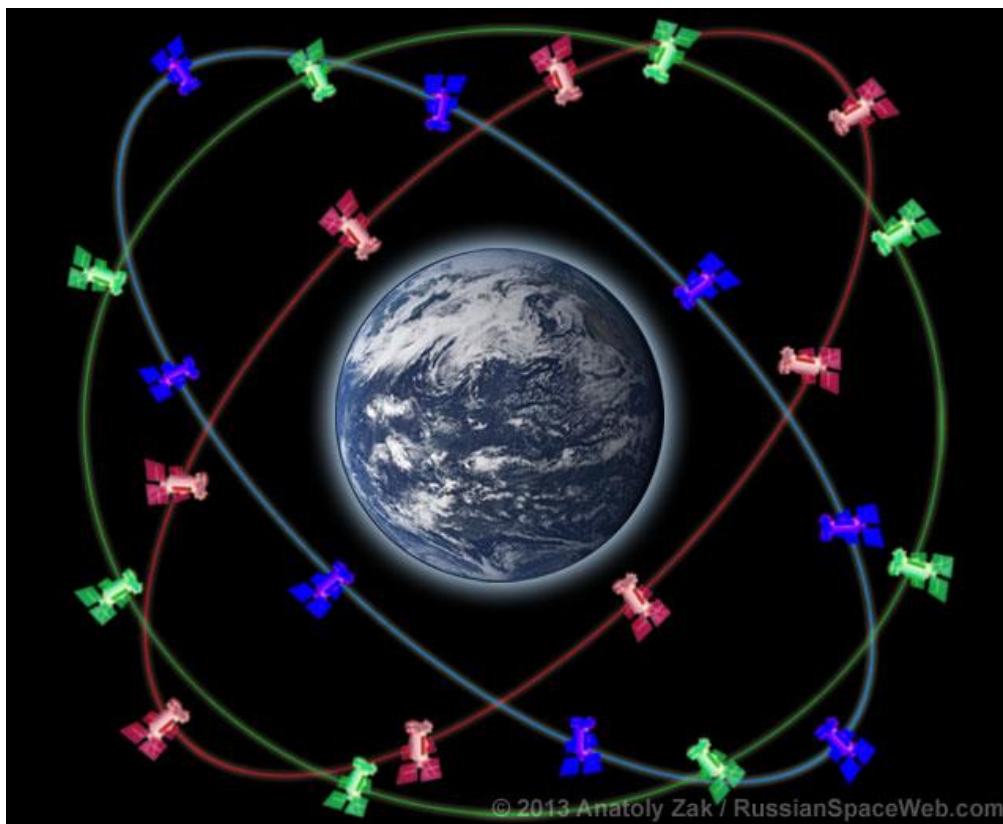
1. svemirski – stabilnost/pouzdanost satelitskog sustava;
2. kontrolni – pogreška efermida¹;
3. korisnički – ionosfersko i troposfersko kašnjenje, šum (rezolucija), prijem reflektiranog signala

4.2.2 GLONASS, GALILEO i BeiDou

Globalni navigacijski satelitski sustav, poznatiji kao GLONASS, drugi je svjetski globalni navigacijski sustav, a razvijen je od strane ruske vojske. GLONASS se sastoji od 24 satelita koji kruže u zemljinoj orbiti u tri orbitalne ravnine (svaka ravnina po 8 satelita). Za ruski teritorij koristi se 18 od 24 satelita kako bi površina Rusije bila pokrivena signalom u cijelosti. Isto kao i kod GPS sustava potrebna su 4 satelita u vidljivom krugu prijemnika kako bi se odredila točna lokacija, [24].

Pomoću GLONASS sustava moguće je ostvariti dvije razine točnosti: autoriziranu i neautoriziranu. Autorizirana točnost koristi se kod vojnih primjena i ima pogrešku prilikom lociranja do 5 metara, [21].

¹ Zemaljska stanica za praćenje šalje orbitalne informacije glavnoj kontrolnoj stanici, koja šalje satelitima ispravljene podatke. Ti ispravljene i egzaktni podaci o položajima nazivaju se "efemeride"<http://www.kartografija.hr>



Slika 6. Raspored satelita po orbitalnim ravninama za sustav GLONASS

Nakon ruskog satelitskog sustava, krenuo je u razvoj 2011. godine i europski. Galileo navigacijski sustav je počeo operativno raditi 2016. godine. Cilj razvoja ovog sustava zapravo je bio osigurati ljudima, koji se nalaze u državama Europe jedan samostalni navigacijski sustav, ako bi se u bilo kojem trenutku GPS, GLONASS ili neki drugi navigacijski sustav ugasio ili zabranio u Europi. Sustav se sastoji od 24 satelita koji su operativni i 6 aktivnih u rezervi, [22], [23].

Glavni servisi ovog sustava trebaju biti, [25]:

- sustavi otvorenog korištenja – sustav bi trebao biti dostupan svima besplatno, pa čak i onima koji ga žele koristiti u *mass-market* sustavima;
- sustavi visoke preciznosti HAS (eng. *High Accuracy Service*) – besplatno dostupna svima preciznost i do jednog centimetra;

- siguran (enkriptiran) i reguliran sustav PRS (eng. *Public Regulated Service*) – dizajniran tako da koristi mehanizme za odbijanje šumova i otkrivanje problema;
- *Search and Rescue sustav* (SAR) – sustav koji omogućava prikupljanje SOS signala s brodova, aviona ili osoba, i slanje tog signala najbližim hitnim službama.

BeiDou sustav kineski je odgovor na sve veće globalne navigacijske sustave koji postoje. Razvoj ovog satelitskog sustava krenuo je početkom 2000-ih. A, 2012. godine sustav je postao aktivan za Kinu i regionalne države. Kako bi se mogao i globalno koristiti 2020. godine lansiran je i zadnji satelit, i time je BeiDou postao globalni navigacijski sustav. Sastoji se od 35 satelita koji pokrivaju cijelu Zemlju, [26].

4.3 Protokoli za slanje podataka putem GNSS tehnologije

NMEA (eng. *National Marine Electronics Association*) je protokol koji koristi ASCII način kodiranja koji se temelji na engleskoj abecedi. Podaci se razmjenjuju u obliku NMEA rečenica koja se sastoji od tipa poruke, sadržaja i kontrolnog zbroja. Svaka rečenica počinje ključnom riječi koja se sastoji od znaka '\$', slova 'G' i 'P' i tri slova koja definiraju format. Ukupno postoji 45 tipa NMEA poruke, a npr. poruka za *Global Positioning System Fix Data* kodira se kao \$GPGGA. Tablica 4, [17].

Tablica 4. Dijelovi NMEA poruke i njihov opis

Ime	Primjer	Jedinica	Opis
<i>Message ID</i>	\$GPGGA		GGA protokol naslov
<i>UTC Time</i>	161229.487		hhmmss.sss
<i>Latitude</i>	3723.2475		ddmm.mmmm
<i>N/S Indicator</i>	N		N=sjever or S=jug
<i>Longitude</i>	12158.3416		dddmm.mmmm
<i>E/W Indicator</i>	W		E=istok or W=zapad

<i>Position Fix Indicator</i>	1		vrijednosti od 0-6 ²
<i>Satellites Used</i>	07		raspon od 0 do 12
<i>HDOP</i>	1.0		<i>Horizontal Dilution of Precision</i>
<i>MSL Altitude</i>	9.0	metri	
<i>Units</i>	M	metri	
<i>Geoid Separation</i>		metri	
<i>Units</i>	M	metri	
<i>Age of Diff. Corr.</i>		sekunde	<i>null</i> vrijednosti ako <i>Differential GPS</i> nije u uporabi
<i>Diff. Ref. Station ID</i>	0000		
<i>Checksum</i>	*18		
<CR> <LF>			kraj poruke

GPX (eng. *GPS Exchange Format*) je protokol odnosno XML podatkovni format koji koristi lako razumljive oznake³. GPX omogućuje razmjenu GPS podataka između web servisa i aplikacija u XML formatu koji sadrži npr. rute ili smjerove kretanja vozila, Tablica 5.

Tablica 5. Primjer GPX poruke

```
<gpx xmlns#"http://www.topografix.com/GPX/1/1"
xmlns:gpvx#"http://www.garmin.com/xmlschemas/GpxExtensions/v3"
xmlns:gpxtpx#"http://www.garmin.com/xmlschemas/TrackPointExtension/v1"
creator#"Oregon 400t" version#"1.1"
xmlns:xsi#"http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:schemaLocation#"http://www.topografix.com/GPX/1/1
```

² Vrijednosti i opisi indikatora popravka pozicije
0 popravak pozicije nije moguć ili nije validan
1 GPS SPS Mode, popravak validan
2 *Differential GPS*, SPS Mode, popravak validan
3-5 nije podržano
6 *Dead Reckoning Mode*, popravak validan

³ XML – Extensible Markup Language – programski jezik koji sadrži set pravila za označavanje podataka i koji je razumljiv i čovjeku i računalu

```
http://www.topografix.com/GPX/1/1/gpx.xsd
http://www.garmin.com/xmlschemas/GpxExtensions/v3
http://www.garmin.com/xmlschemas/GpxExtensionsv3.xsd
http://www.garmin.com/xmlschemas/TrackPointExtension/v1
http://www.garmin.com/xmlschemas/TrackPointExtensionv1.xsd">
```

```
<metadata>
  <link href#"http://www.garmin.com">
    <text>Garmin International</text>
  </link>
  <time>2009-10-17T22:58:43Z</time>
</metadata>
<trk>
  <name>Example GPX Document</name>
  <trkseg>
    <trkpt lat#"47.644548" lon#" -122.326897">
      <ele>4.46</ele>
      <time>2009-10-17T18:37:26Z</time>
    </trkpt>
    <trkpt lat#"47.644548" lon#" -122.326897">
      <ele>4.94</ele>
      <time>2009-10-17T18:37:31Z</time>
    </trkpt>
    <trkpt lat#"47.644548" lon#" -122.326897">
      <ele>6.87</ele>
      <time>2009-10-17T18:37:34Z</time>
    </trkpt>
  </trkseg>
</trk>
</gpx>
```


4.4 Obrada FCD podataka i mogućnosti primjene

Mogućnosti estimacija i različitih analiza na temelju podataka koji se šalju putem FCD tehnologije mogu se vidjeti u veličinama poput, [20]:

- vremena putovanja i brzine između dvije točke na mreži;
- vremena putovanja i brzine na linkovima (npr. segment prometnice);
- stanja prometne mreže (indeks zagušenja).

Ako su podaci dovoljno učestali i konzistentni moguće je, [20]:

- detektirati zagušenja u stvarnom vremenu i incidentne situacije;
- estimirati duljine repova čekanja i kašnjenja na raskrižjima;
- doprinijeti određivanju P-O matrica mreže.

Poznavanjem povijesnih podataka (FCD) uz poznavanje stvarnih vremenskih podataka moguće je odrediti i izračunati profile brzina, predvidjeti vrijeme putovanja, predvidjeti zagušenje u određenim vremenskim intervalima (npr. po satima u danu) i dr. Najveći nedostaci same primjene FCD tehnologije su zahtjevna obrada podataka i zaštita privatnosti. Ako se koriste podaci koji se prikupljaju s terminalnih uređaja korisnika u pitanje se dovodi privatnost osobe koja posjeduje terminalni uređaj. Najveće prednosti primjene FCD podataka zapravo su velika rasprostranjenost uređaja koji šalju podatke i velika količina podataka koja se može koristiti za obradu, [20].

Tablica 6. Prednosti i nedostaci FCD tehnologije naspram drugi detektora prometnog toka

	prednosti	nedostaci
FCD	<ul style="list-style-type: none">- velika prostorna pokrivenost- određivanje stanja cijele prometne mreže- minimalni troškovi (nema ulaganja u postavljanje infrastrukture i sl.) ako se	<ul style="list-style-type: none">- zahtjevna obrada podataka- u fazi je istraživanja i razvoja- pitanje zaštite privatnosti

	<p>podrazumijeva korištenje postojećih vozila koja posjeduju FCD tehnologiju</p> <ul style="list-style-type: none"> - vrlo vrijedni i kvalitetni podaci (uz dovoljan udio FCD vozila, učestalost slanja poruka) - posebno pogodni za prikupljanje podataka u gradskim područjima - nema utjecaja vremenskih prilika - redundancija (ispad jednog pokretnog osjetila ne utječe bitno na kvalitetu rezultat) 	<ul style="list-style-type: none"> - troškovi prijenosa poruka mogu biti veliki (telekomunikacijski troškovi) - zahtjeva usklađivanje raznih interesnih skupina (administrativna tijela, upravljanje i nadzor prometa, znanstvenici i stručnjaci, taksi i druge službe i dr.)
--	--	---

Razna istraživanja izvršena su korištenjem FCD podataka. Analize za izračun stanja uslužnosti LOS (eng. *Level of Service*) se često izračunavaju pomoću FCD podataka. LOS se kategorizira u 6 kategorija od A do F, gdje je A optimalno stanje prometnice ili mreže, a F najlošije. U istraživanju [27], istraživači su uspjeli na dionici od 4.5 kilometra u gradu Ankari (Turska) pomoću FCD podataka definirati uska grla i razinu uslužnosti te dionice. Uz samo jedan izvor podataka (prosječna brzina putovanja iz FCD podataka) uspjeli su dokazati da je moguće izračunati kritične točke (uska grla) na prometnici.

4.5 Pokretne ćelijske mreže

4.5.1 Podjela pokretnih ćelijskih mreža

Danas se za određivanje lokacije koristi veliki broj primopredajnika kako bi se pokrilo cijelo geografsko područje. Većina primopredajnika koristi GSM (eng. *Global System for Mobile Communication*) standard.

Kroz blisku povijest, standarde odnosno pokretne ćelije mogu se podijeliti u generacije, [28]:

- druga generacija 2G – GSM;

- treća generacija 3G – UMTS (eng. *Universal Mobile Telecommunications System*);
- četvrta generacija 4G – LTE Advanced (eng. *Long Term Evolution Advanced*).

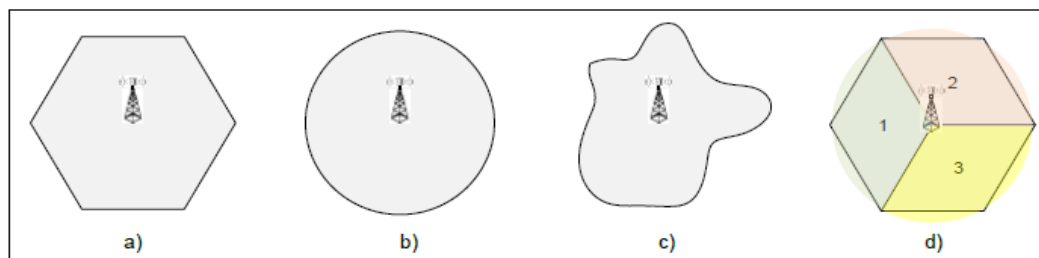
Prije druge generacije mobilne mreže kategoriziraju se kao nulta i prva generacija. Primjeri takvih mreža su razni poput *Push To Talk*, MTS (eng. *Mobile Telephone System*), i napredniji sustavi mobilne telefonije koji su imali mogućnost *handovera* poziva, poput npr. AMPS (eng. *Advance Mobile Telephone System*), [28].

Ćelija je osnovna geografska jedinica ćelijske mreže i odnosi se na područje koje je pokriveno radiosignalom pripadne bazne stanice. Svaka ćelijska mreža mora sadržavati, [28]:

- podsustav baznih stanica (eng. *Base Station Subsystem*);
- podsustav za komutaciju i mrežu (eng. *Network and Switching Subsystem*);
- podsustav za potporu i održavanje (eng. *Operations Support System*).

Podsustav bazne stanice sastoji se od primopredajne bazne stanice (BTS) i upravljačkog djela bazne stanice (BSC). Podsustav bazne stanice sadrži primopredajne uređaje koji svojim dometom definiraju ćeliju i usklađuju protokole radio prijenosa s mobilnom stanicom. Glavni dio podsustava za komutaciju i mrežu je mobilna centrala (MSC). Mobilni servisni komutacijski centar (MSC) radi kao komutacijski čvor, odnosno vrši spajanje veza, usmjerava informacijske tokove, sadrži baze podataka (HLR i VLR)⁴ i slično, [28].

Ćelija se definira na osnovu broja korisnika u određenom području, no na oblik ćelije utječe reljef, građevine i uvjeti propagacije signala. Prikaz ćelije definira se šesterokutnim modelom Slika 7 a), a idealni oblik ćelijske mreže bio bi krug, Slika 7 b), [20].



Slika 7. Oblici mobilne ćelije

⁴ HLR – eng. *Home Location Register*, VLR – eng. *Visitor Location Register*, baze podataka koje sadrže podatke o pretplatnicima (poput lokacije)

4.5.2 Lociranje vozila pomoću ćelijskih mreža

Lociranje se vrši automatski kada je mobilna stanica uključena, a ako je neaktivna (uključena, ali nema telefonskog poziva ili prijenosa podataka) ažuriranje lokacije se vrši kada mobilna stanica prijede u drugu ćeliju. Za lociranje vozila vrlo je bitna gustoća baznih stanica odnosno njihova prostorna raspodjela unutar gradskog područja. Gustoća ćelijske mreže ovisi o broju korisnika mreže i okolišu, [20].

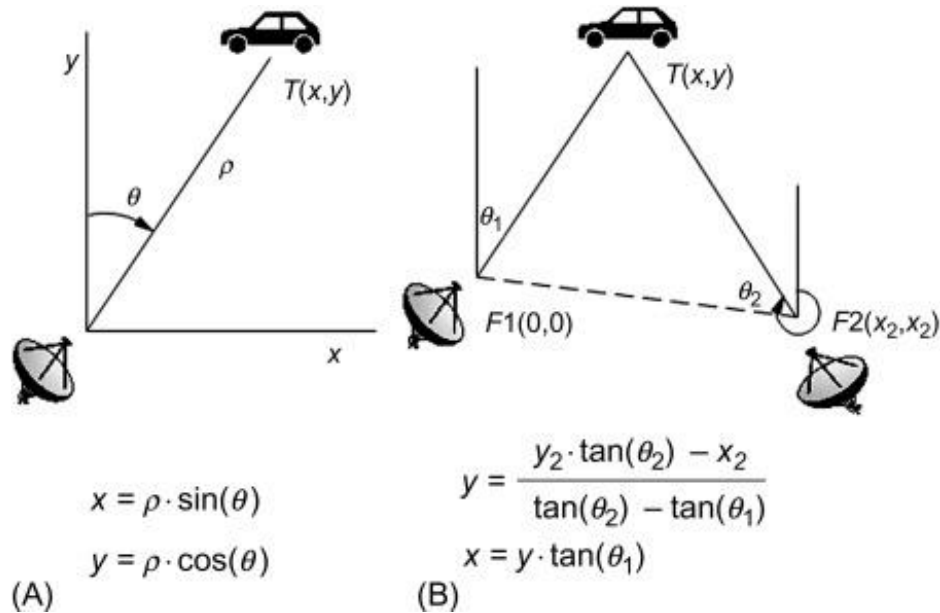
Za lociranje vozila u ćelijskoj mreži koriste se različite metode. Jedna od najjednostavnijih je lociranje zasnovano na identifikaciji ćelije (eng. *Cell-Identification*). Lociranje se vrši tako da se poznaje, [29]:

- MCC (eng. *Mobile Country Code*) – kod koji je jedinstven za svaku državu;
- MNC (eng. *Mobile Network Code*) – jedinstveni kod za svaku mobilnu mrežu;
- LAC (eng. *Location Area Code*) – jedinstveni kod za svako lokalno područje;
- CID (eng. *CellID*) – jedinstvena oznaka koja označava baznu stanicu.

Ako se mobilna stanica pojavi u ćeliji, pomoću ova 4 parametra moguće je identificirati lokaciju mobilne stanice, i to u kojoj ćeliji se nalazi, lokalnom području, mreži i državi. Prednost ove metode je što nije potrebna nikakva dodatna nadogradnja postojeće infrastrukture ćelijske mreže, ali je nedostatak što se ne može odrediti točna lokacija vozila (greška u gradskom području od 10 metara do 1 kilometra ovisno o veličini ćelije), [29], [30].

Lociranje zasnovano na određivanju kuta dolaska signala (eng. *Angle of Arrival* – AoA) je metoda u kojoj se mjeri kut između dolaznog signala u baznoj stanici i same bazne stanice. Pomoću ove metode moguće je odrediti lokaciju vozila na više načina. Mogu se vidjeti dva primjera određivanja lokacije vozila, Slika 8. Prva metoda (Slika 8, A) zasniva se na tome da se vozilo locira pomoću jedne bazne stanice i mjerenja gore navedenog kuta. Dok, druga metoda (Slika 8, B) koristi dvije bazne stanice i pravce usmjerenih antena od baznih stanica. Vozilo se nalazi na sjecištu ova dva pravca i na taj način se određuje lokacija vozila nakon što se odredi kut snopa antene u odnosu na zajednički referentni smjer. U teoriji dovoljne su dvije bazne stanice kako bi se dobila točna pozicija mobilne stanice, no u stvarnosti bolja točnost se ostvaruje s tri bazne stanice, [31].

Lociranje zasnovano na mjerenju vremena razlike dolaska signala (eng. *Time Difference of Arrival* – TDOA) je metoda koja mjeri razliku u dolasku signala poslanog mobilnom stanicom do bazne stanice i dolasku signala u susjedne bazne stanice, [31].



Slika 8. AoA - primjer dvije metode za određivanja pozicije vozila

Za najtočnije lociranje koriste se sustavi koji koriste GNSS tehnologiju u kombinaciji s ćelijskom mrežom. Sustavi poput ovog omogućuju visoku točnost lociranja i lociranje u zatvorenim prostorima, a često se nazivaju A-GPS (eng. *Assisted GPS*), [21], [28].

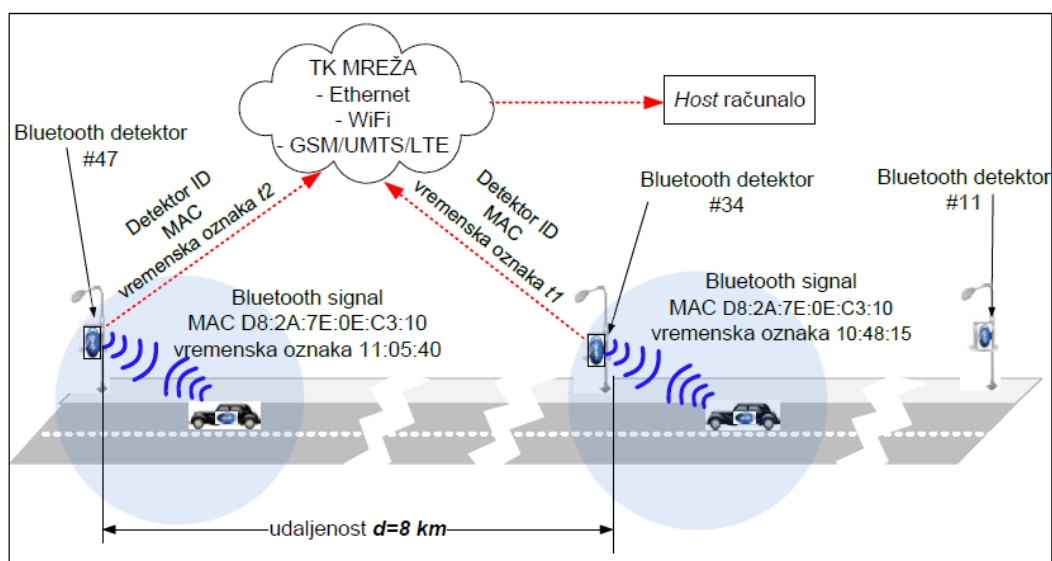
4.6 Bluetooth detektori

Bluetooth je standard bežične tehnologije koji se koristi za razmjenu podataka između različitih fiksnih ili mobilnih uređaja. Za razmjenu podataka, Bluetooth tehnologija koristi kratke valne duljine koje se nalaze u spektru od 2.402 GHz do 2.483 GHz. Područje unutar ovog spektra podijeljeno je na 79 kanala s razmakom od 1 MHz. Bluetooth uređaji dijele se u 3 klase, [32]:

- Klasa 1 – doomet do 100 metara;
- Klasa 2 – doomet do 20 metara,
- Klasa 3 – doomet do 10 metara;

i posebna klasa uređaja koja je napravljena kako bi se koristila u IoT rješenjima *Bluetooth Low Energy* – BLE. Prednost ove vrste Bluetooth tehnologije je mala potrošnja električne energije. To omogućava veću autonomiju IoT uređaja.

Slika koja je preuzeta iz [20] prikazuje princip prikupljanja podataka o prometnim tokovima, Slika 9. Prikupljanje podataka u prometu pomoću Bluetooth tehnologije zasniva se na dvije osnovne komponente: Bluetooth detektor i *host* računala. Način prikupljanja podataka se vrši tako da se vozilima koja se nalaze u dometu Bluetooth detektora, registriraju MAC adrese Bluetooth uređaja koji se nalaze u vozilima. Vozila se mogu identificirati obzirom da je svaka MAC adresa jedinstvena za svaki uređaj, i pomoću toga mogu se dobiti parametri poput vremena putovanja između lokacija na kojima su postavljeni Bluetooth detektori ili se mogu procjenjivati obrasci putovanja, [20], [33].



Slika 9. Sustav za detektiranje prometnih parametara pomoću Bluetooth tehnologije

4.7 RFID sustav

RFID (eng. *Radio Frequency Identification*) je naziv za sve tehnologije koje koriste radio valove kako bi automatski detektirali ljude ili vozila. Standardni RFID sustav sastoji se od čitača (eng. *Reader*) i transpondera (eng. *Transponder*). *Transponder* ili RFID *tag* je nositelj podataka

koji sadrži jedinstvenu oznaku. *Transponder* se postavlja na objekte koji se trebaju identificirati, [20].

RFID sustavi u većini slučajeva rade tako da *transponder* šalje identifikacijski signal koji prima čitač. Kada čitač primi signal, čitač signal može obraditi i vratiti nazad ili može pročitati određeni kod u svojoj memoriji i nakon toga poslati kod nazad *transponderu*, [31].

RFID *transponderi* dijele se prema vrsti napajanja, [20]:

- pasivni – nemaju vlastito napajanje, koristi se primljena energija radiovalova čitača prilikom komunikacije (manji trošak), a nedostatak je kratki doomet;
- aktivni – sadrže vlastito napajanje, čime je veći doomet čitača;
- djelomično aktivni – sadrže napajanje za mikročip, ali za odašiljanje signala koriste se energija primljena od radiovalova čitača.

RFID sustav u prometu primjenjuje se za prikupljanje podataka o vremenu putovanja, brzini vozila na mreži, broju vozila i klasifikaciji vozila. Također, RFID tehnologija nalazi primjenu i u elektroničkoj naplati cestarine, praćenje robnih dobara u transportu, naplatu javnog prijevoza, i ostalo, [20].

4.8 Automatsko prepoznavanje tablica

ANPR (eng. *Automatic Number Plate Recognition System*) je sustav za prepoznavanje registarskih tablica korištenjem računalnog vida. ANPR koristi se u rukovođenju, sankcioniranju prometnih prekršaja, naplate cestarine ili kontroli pristupa i prolaza, [34].

Kako bi jedan ovakav sustav funkcionirao potrebni su, [20]:

- davač poticaja (eng. *Trigger*);
- kamera;
- dodatno osvjetljenje;
- *frame grabber* kartica;
- računalo s programskom podrškom;
- baza podataka.

Trigger daje naredbu kada se registarska tablica treba detektirati. Davač poticaja se obično izvodi kao dodatni detektor prometnog toka ili softverski, tj. kamera ima mogućnost video detekcije. *Frame Grabber* je elektronički uređaj koji iz analognog ili digitalnog videosignala preuzima, sprema i prosljeđuje video okvire u digitalnom obliku prikladnom za daljnju računalnu obradu, [20].

Suvremeni sustavi prepoznavanje tablica imaju mogućnost prepoznavanja tablice u vremenu od 50 ms. Algoritmi koji se koriste za automatsko prepoznavanje registarskih tablica u većini slučajeva koriste 4 koraka kako bi izvršili prepoznavanje, [34]:

- 1) dokumentiranje slike vozila;
- 2) detektiranje registarske tablice;
- 3) segmentacija znakova s registarske tablice;
- 4) prepoznavanje znakova segmentiranih znakova.

Kako bi se prepoznala registarska tablica potrebno je uzeti u obzir nekoliko čimbenika. Prvi je veličina same registarske tablice koja može varirati ovisno o slici. Drugi je da se tablica može nalaziti bilo gdje na vozilu. Svaka registarska tablica isto tako može imati i različite boje u pozadini, a najčešći oblik je bijela pozadina s crnim slovima. Također, često se na registarskim tablicama mogu nalaziti i vijci, koje sustav u obradi može segmentirati kao tekstualni znak, [34].

5 ESTIMACIJA RASPODJELE PROMETNOG ZAGUŠENJA: STUDIJA SLUČAJA NA PRIMJERU AUSTRIJSKOG GRADA DEUTSCHLANDSBERGA

5.1 Opis sustava prikupljanja i pripreme podataka

5.1.1 Prikupljanje podataka

Podaci na kojem se temelji estimacija raspodjele prometnog zagušenja u gradu Deutschlandberg prikupljeni su od 01.05.2019. do 01.06.2020. Za obradu podataka korišteni su programski paket Microsoft Excel i programski alat za baze podataka DBeaver. Vozila pomoću kojih su prikupljeni podaci su dostavna i ophodna. Za prikupljanje podataka koristili su se uređaji koji za određivanje pozicije vozila koriste GNSS tehnologiju, Slika 10.

Uređaj Teltonika FMA110 ima mogućnost slanja podataka na server pomoću GPRS tehnologije, slanja naredbi uređaju putem SMS-a, instaliranja dodatnih osjetila i dr. Pogreška prilikom lociranja vozila je do 3 metra odstupanja od stvarne lokacije vozila, [35].

Spajanjem na mikro USB port, uređaj se može dodatno konfigurirati prema preferencijama pomoću posebnog softvera. Na taj način može se konfigurirati npr. period prikupljanja i slanja podataka ili slanja alarma (SMS-om ili e-mailom) nakon izlaska vozila iz određene geografske zone, [35].



Slika 10. Teltonika FMA110 uređaj za praćenje

Podaci prikupljeni od vozila odnosno uređaja koji se nalaze u vozilima, spremaju se kao sirovi podaci (tip podataka *string*) u Postgres bazu podataka, Tablica 7. Postgres je besplatan sustav za upravljanje relacijskim bazama podataka koji je otvorenog koda. Podržava obradu SQL (relacijske) i JSON (nerelacijske) baze podataka, [36].

Postgres podržava i niz programskih jezika poput Python, Java, C#, C/C+ i dr., Također, ima niz mogućnosti poput, [36]:

- definiranja vrste podataka (eng. *User-defined Types*);
- nasljeđivanja tablice (eng. *Table Inheritance*);
- mehanizme kriptiranja (zaključavanja) podataka (eng. *Sophisticated Locking Mechanism*);
- strane ključeve (eng. *Foreign Key Referential Integrity*);
- poglede, pravila, pod-upite i dr.

Tablica 7. Primjer sirovog podataka

Naziv atributa	Vrijednost
"1"	"1"
"2"	"0"
"78"	"89381246060265549"
"239"	"1"
"gps_sat"	"16"
"latitude"	"46.867485"
"priority"	"0"
"gps_speed"	"13"
"longitude"	"15.2249583"
"timestamp"	"2018-02-23T08:48:01Z"
"gps_heading"	"318"
"io_event_id"	"0"
"gps_altitude"	"392"

Svaki podatak odnosno naziv atributa definira određenu vrijednost i taj naziv atribut uvijek je isti. Primjerice, atribut „239“ definira da li je motor vozila upaljen „1“ ili ugašen „0“. Dok recimo atribut „gps_sat“ definira broj vidljivih satelita koje vidi uređaj u određenom trenutku „timestamp“, a „gps_speed“ brzinu kretanja vozila.

5.1.2 Priprema podataka

Priprema podataka služi kako bi se dobile potrebne vrijednosti za izračun estimacije prometnog zagušenja. Kako bi se dobile te vrijednosti (prosječna brzina vozila, vrijeme putovanja vozila na ruti, prijeđena udaljenost na ruti) potrebno je napraviti interni sustav za obradu i prikaz podataka koji se naziva *report*. *Report* omogućava prikaz podataka na digitalnoj karti i u tablicama u odabranom vremenskom intervalu. Kao digitalna karta koristi se besplatni sustav OpenStreetMap. Digitalna karta može se definirati kao svaka kartografska vizualizacija u digitalnom formatu koju je moguće prikazati na zaslonu računala ili otisnuti. Pomoću *map matching* algoritma lokacije odnosno rute vozila se iscrtavaju na digitalnu kartu. *Map matching* označava postupak smještanja geografskog objekta na digitalnu kartu. Cilj *map matchinga* prilikom iscrtavanja rute vozila je smjestiti vozila što bliže središtu cestovne prometnice, [37].

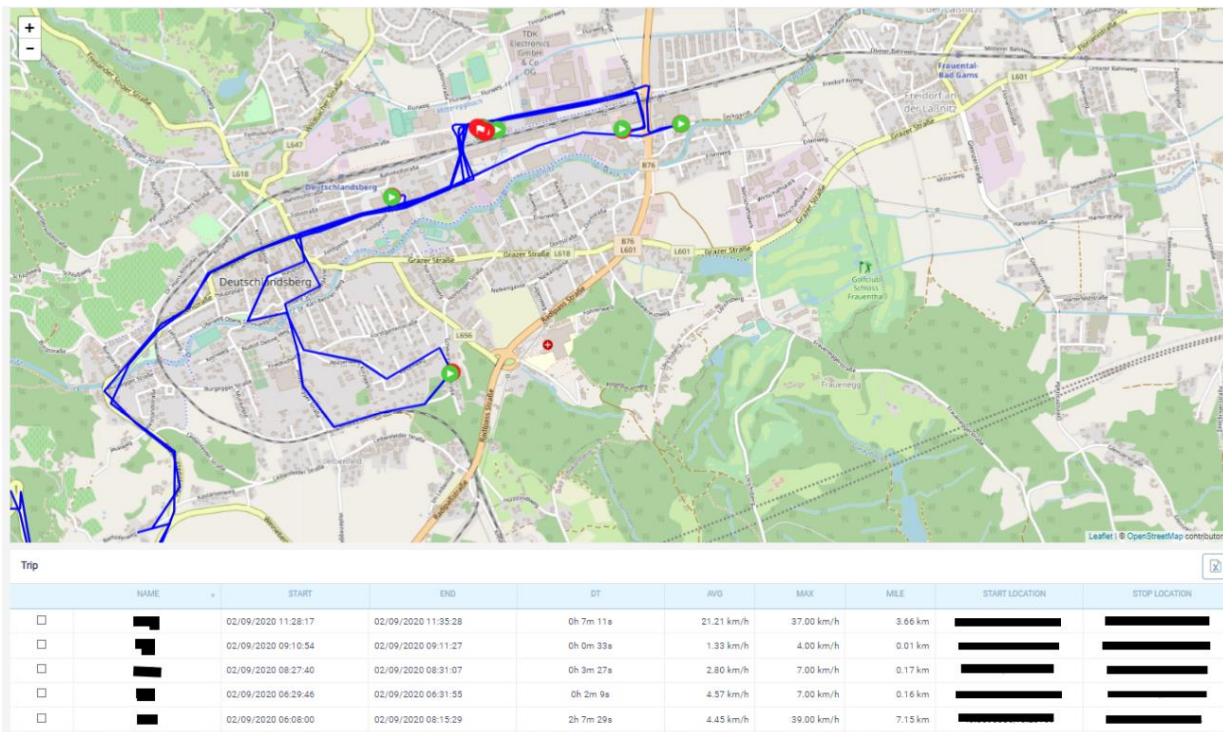
Report koji prikazuje rute vozila u vremenu je sustav koji funkcionira tako da se u njemu definiraju osnovni elementi (*featuri*) koji su nužni da bi *report* funkcionirao, a to su:

- *feature* za zemljopisnu širinu i dužinu;
- *timestamp* (vremenske oznake na ruti);
- *feature* za vremensku oznaku početka i kraja putovanja.

Dodatno ovisno o potrebi mogu se definirati i elementi poput prosječne ili maksimalne brzine vozila na ruti, potrošnje goriva i ostalo.

Svaki *feature* omogućava manipulaciju podataka od toga da se podaci mogu samo pretvoriti iz oblika *string* (tekstualni oblik) u *int* (cijeli broj), ili npr. da se izračuna vrijeme trajanja jednog putovanja vozila (vremenski interval između početka putovanja i kraja putovanja). Svi obrađeni podaci spremaju se u dodatnu tablicu koja kao strani ključ ima ID iz prve tablice za svaki red podataka koje je vozilo poslalo.

Reporti se kreiraju tako da se koristi interna infrastruktura koja se nalazi na web portalu. Nakon kreiranja *reporta* (Slika 11) automatski se generira nova tablica koja se puni novim podacima (vrijednostima s rute) pomoću automatiziranih pod procesa. Podaci se sortiraju po ruti u novu generiranu tablicu, npr. podaci o vremenskoj oznaci početka putovanja i kraja putovanja, brzini, prijedenoj udaljenosti od prethodne točke, Tablica 8.



Slika 11. Primjer *reporta* za iscrtavanje ruta vozila i tablice s vrijednostima za svaku rutu

Pomoću programskog alata DBeaver podaci su eksportirani tako da se napravila filtracija podataka po zonama i uzeta su ona putovanja na ruti koja su imala prijedenu udaljenost veću od 10 metara. Podaci su odmah prilikom eksportiranja filtrirani po zonama i vremenskom intervalu (*feature start_ts*), odnosno unutar *feature* (Kod 1) za zemljopisnu širinu i dužinu postavljene su granice zona.

```

SELECT trip_id, SUM(f_31) as prijedjena udaljenost, AVG (f_38) as prosjecna brzina,
MAX (f_38) as maksimalna brzina, MIN ( start_ts) as pocetak putovanja,
MAX (end_ts) as kraj putovanja
FROM trip_6cd7bc71_9917_4e48_a205_677c681bf900_335
WHERE (latitude_feature BETWEEN '46.80866637814256' AND '46.82593483665976'
AND
longitude_feature BETWEEN '15.220398902565593' AND '15.2331018447876')
AND start_ts between '2019-05-01 00:00:01' and 2019-06-01 00:00:01'
GROUP BY trip_id
HAVING SUM(f_31) > '0.01'
ORDER BY start ASC

```

Kod 1. Primjer pred-obrade podataka za Zonu2

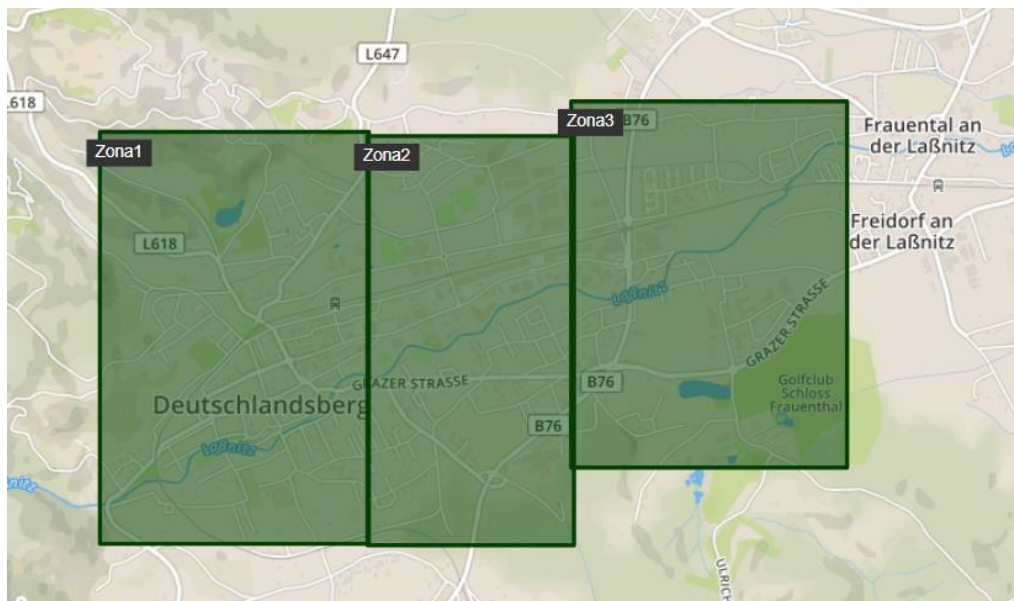
Podatak prikazan u stupcima „prijedjena udaljenost“, „prosječna brzina“ i „maksimalna brzina“ je podatak o udaljenosti, prosječnoj i maksimalnoj brzini koje je vozilo napravilo u određenoj zoni u vremenskom intervalu prikazanom u stupcima „vremenska oznaka početka“ i „vremenska oznaka kraja“, Tablica 8. Ovi podaci su zapravo rezultat pred-obrade podataka i oni služe kao osnovica za obradu podataka. Potrebno je naglasiti da su stupci „vremenska oznaka početka“ i „vremenska oznaka kraja“ vrijednosti od koje su ili dio rute koje je vozilo napravilo u zoni ili cjelovite rute ako je ruta u cijelosti bila u zoni u tom vremenskom intervalu (jednako vrijedi i za ostale vrijednosti u tablici, Tablica 8).

Tablica 8. Primjer obrađenih podataka za Zonu2

ID rute	Prijeđena udaljenost	Prosječna brzina	Maksimalna brzina	Vremensk a oznaka početka	Vremensk a oznaka kraja
052ef775-8bef-410e-997b-b4c7ea7c25a4	0.71	20.47368	50	5:40:09 AM	5:42:59 AM
6fce9406-fb26-4b90-9ea3-1f39579410ec	0.67	22.29412	48	5:38:58 AM	5:41:04 AM
6b93b6a6-4e94-4443-b314-38d8a9e2b44b	0.66	18.47059	47	5:31:08 AM	5:35:00 AM
6c63681f-6176-434a-9e94-615f80e568e5	0.68	19.71429	56	5:39:33 AM	5:43:21 AM
0dfbc8bc-83df-40cf-9af3-9f691c71c834	0.68	18.625	46	5:39:59 AM	5:42:26 AM

5.1.3 Područje prikupljanja podataka

Kako bi se definirale vrijednosti prometnog zagušenja, u ovom radu koristili su se podaci o lokaciji i brzini vozila (prosječna i maksimalna brzina na ruti), prijeđenoj udaljenosti na ruti i vremenu trajanja putovanja. Podaci su se obrađivani na osnovu tri definirane zone unutar grada. S obzirom na veličinu i oblik grada zone su definirane kao dvije rubne (ulaz i izlaz iz grada), Slika 12 a) i c) i unutarnja zona odnosno centar grada, Slika 12 b). Nakon filtriranja podataka po zonama i po količini prijeđene udaljenosti, podaci su sortirani u 24-satne vremenske intervale pomoću alata Microsoft Excel (pomoću funkcije *Sort & Filter*).



Slika 12. Definirane zone unutar grada - a) Zona1, b) Zona2 i c) Zona3

5.2 Estimacija prometnih zagušenja pomoću indeksa pada brzine

5.2.1 Indeks pada brzine

Kako bi se estimiralo prometno zagušenje jedan od pokazatelja koji se koristio je indeks pada brzine po ruti u odnosu na referentnu brzinu, [9]:

$$R_{vi} = \frac{v_i}{v_{ref}} \quad (5.1)$$

gdje je v_i prosječna brzina na ruti i v_{ref} referentna brzina na ruti (maksimalna dozvoljena). U ovom slučaju s obzirom na veličinu grada i uske ulice kao maksimalna prosječna brzina odabrana je brzina od 40 km/h. A ukupna vrijednost pada brzine za svaki sat u danu definira se kao:

$$R_V = \frac{\sum_{i=1}^N R_{vi}}{N} \quad (5.2)$$

gdje je R_V prosječna vrijednost indeksa pada brzine po satu, $\sum_{i=1}^N R_{vi}$ suma svih R_{vi} po satu, a N ukupan broj izračunatih R_{vi} po satu.

Zagušenje se definira prema intervalu od 0 do 1. Gdje 0 predstavlja najveće zagušenja, a 1 najmanje, Tablica 9.

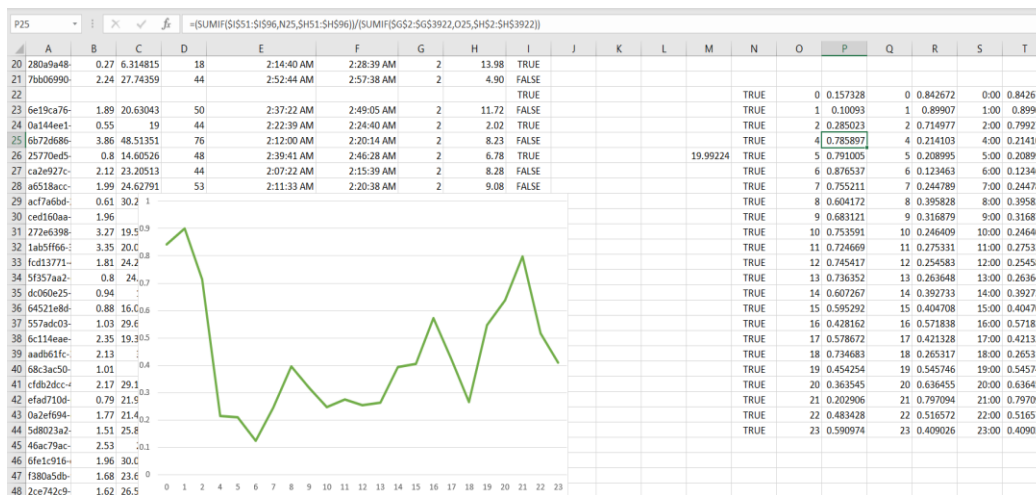
Tablica 9. Indeks pada brzine, [9]

Indeks pada brzine	Vrsta zagušenja
[0,0.25]	Jako zagušenje
[0.25,0.50]	Srednje zagušenje
[0.50,0.75]	Malo zagušenje
[0.75,1]	Minimalno ili nema zagušenja

Za daljnju obradu podataka odnosno za izračun pokazatelja R_v korištene su integrirane funkcije (AVERAGEIF i SUMIF) u programskom alatu Microsoft Excel, Kod 2, Slika 13.

$$R_v = \text{AVERAGEIF}(\$G\$2:\$G\$548,N7,\$H\$2:\$H\$548)$$

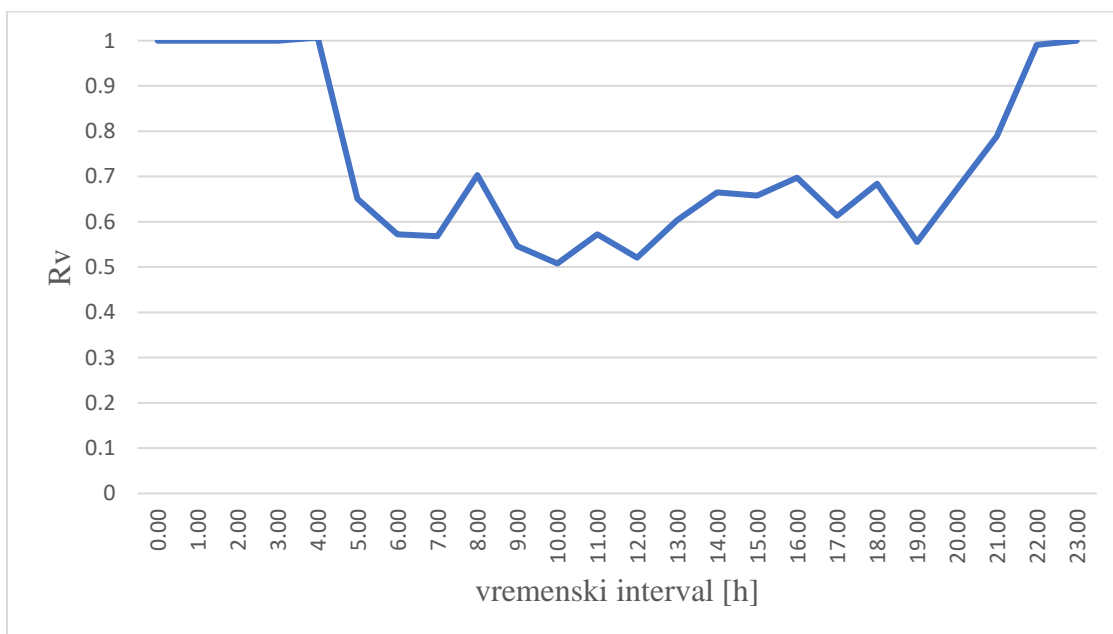
Kod 2. Primjer funkcija za izračun pokazatelja R_v u jednom satu



Slika 13. Primjer obrade podataka u programskom alatu Microsoft Excel

5.2.2 Zona1 – zapadni dio grada

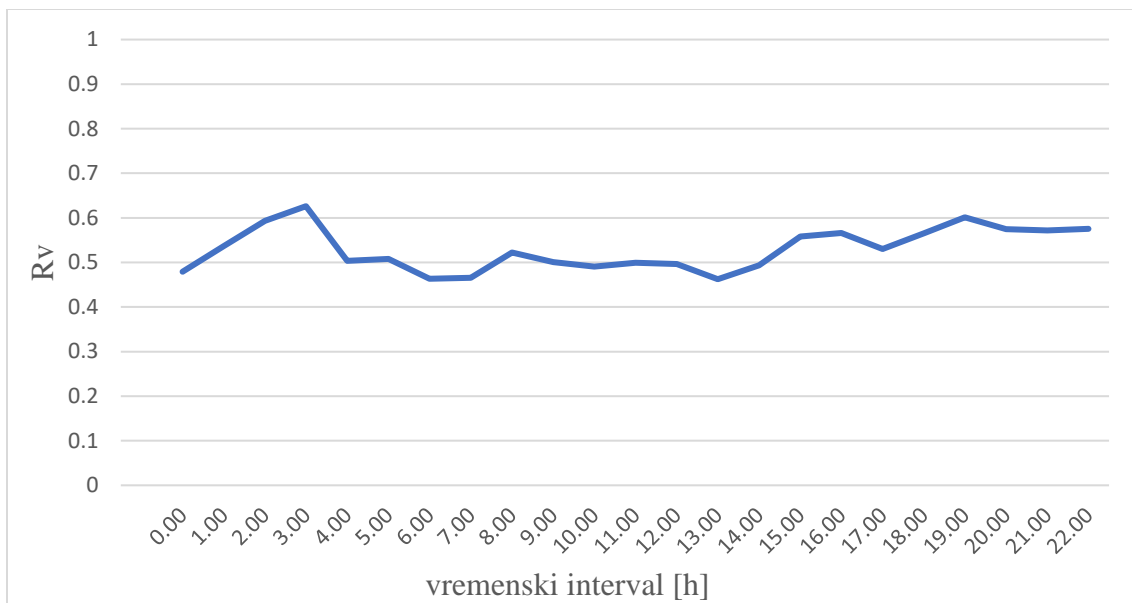
U prvoj zoni odnosno ulazno-izlaznoj zoni grada nalazi se dio zaobilaznice grada, obiteljske kuće i nogometni stadion. Vidljivo je da je u ovoj zoni najveći pad brzine ujutro, u periodu od 8 h do 11 h. Zagušenje u ovom periodu uzrokovano je kretanjem ljudi koji dolaze na posao u grad, a koji žive u području izvan grada (dnevne migracije), Grafikon 4. Period od 9 h do 10 h se može definirati kao srednje zagušen do malo zagušen, Tablica 9.



Grafikon 4. Raspodjela indeksa zagušenja po satima za Zonu1

5.2.3 Zona2 – centar grada

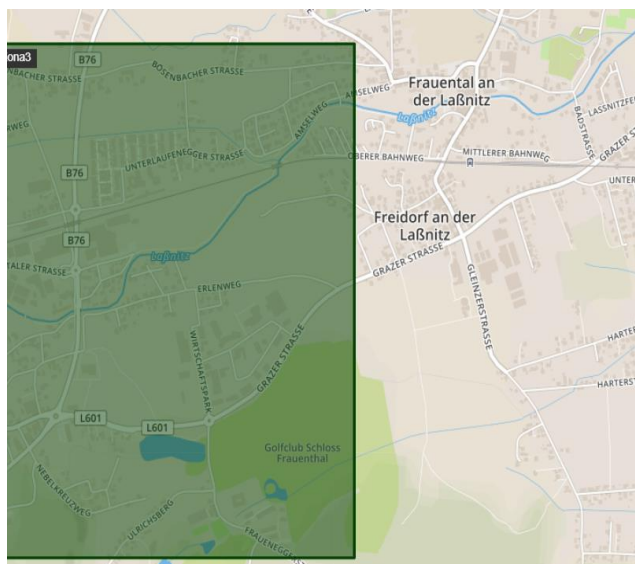
Druga zona definirana je kao centar grada gdje i najveći broj obrađenih podataka, s obzirom na to da veliki broj ruta koje počinju ili završavaju u prvoj ili trećoj zoni prolaze kroz centar grada. Isto tako u centru nalazi se veliki broj trgovačkih kuća i marketa, kao i glavni željeznički kolodvor. Iz tog razloga raspodjela zagušenja odnosno pada brzine kroz cijeli dan je većinom u istim postotcima. No, vidi se da u jutarnjim satima od 5 h do 7 h (Grafikon 5), pokazatelj R_v pada ispod 50% što govori da se radi o srednjem zagušenju, Tablica 9.



Grafikon 5. Raspodjela indeksa zagađenja u Zoni2 – centar grada

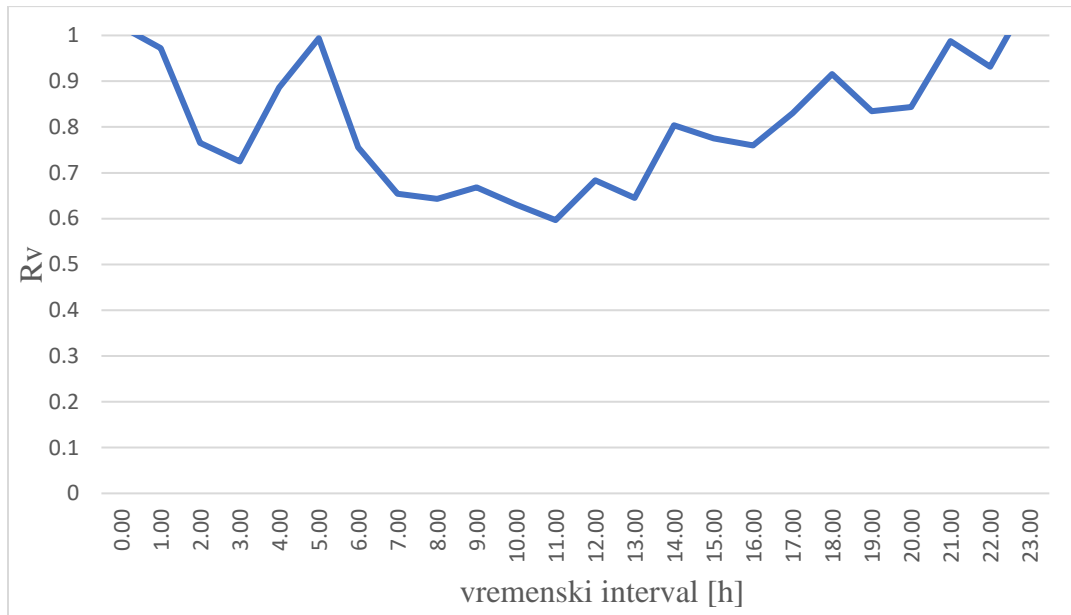
5.2.4 Zona3 – istočni dio grada

Zona 3 nalazi se na istočnom dijelu grada i ona je zapravo izlazni dio grada koji vodi prema sljedećem mjestu Frauental an der Laßnitz, Slika 14. Također, na tom dijelu grada nalazi se golf igralište kao i niz kružnih raskrižja. I u ovoj zoni nalazi se veliki broj tvrtki i trgovina, što isto tako uzrokuje kretanje velikog broja ljudi pogotovo u vršnim satima.



Slika 14. Zona3 – istočni dio grada

U ovoj zoni vidljivo je da se pad brzine kreće od 60% do 100% u nekim satima, tj. da pada brzine čak i nema. Može se zaključiti da zagušenja nema ili da je jako malo, Tablica 9. No, vidljiv je blagi pad brzine u jutarnjim satima (od 7 h do 10 h) što je vjerojatno uzrokovano dolaskom zaposlenika u tvrtke, Grafikon 6.

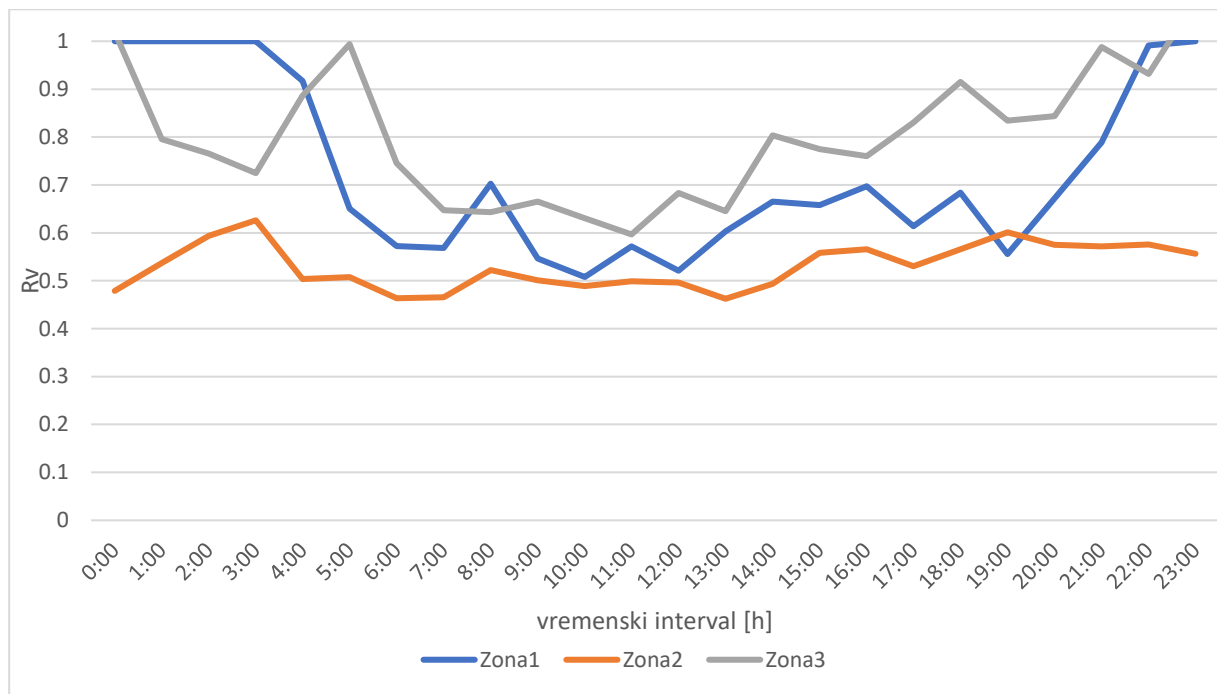


Grafikon 6. Raspodjela indeksa zagušenja u 24 satnom intervalu

5.2.5 Usporedba zagušenja po zonama

Analiziranjem indeksa pada brzine može se zaključiti da je ponašanje Zone1 i Zone3 vrlo slično. Dok centralna zona (Zona2) ima poprilično konstantnu prosječnu brzinu tijekom dana uz male oscilacije. U jutarnjim i popodnevnim satima prosječne brzine u zapadnoj zoni su manje nego u istočnoj, stoga se može zaključiti da su veća zagušenja na zapadu grada. Razlog tomu je vjerojatno veći broj obiteljskih kuća (veća gustoća naseljenosti) u tom području kao i ograničenost prostora. Također, u ovoj zoni nalaze se i škole i drugi gradski objekti i institucije, dok je istočna strana grada više gospodarska zona s tvrtkama i trgovinama. Većina prometnica u području grada su prometnice s dvije trake što ne može odgovoriti prometnoj potražnji koja se događa u jutarnjim satima (povećani broj vozila).

U središnjoj Zoni2 prosječne brzine se kreće u intervalu od 40% do 60% od referente brzine. Razlog tomu je što je ova zona sjecište drugih dviju zona. No, u popodnevnim satima može se vidjeti mali rast prosječnih brzina, što je i očekivano s obzirom na to da i druge dvije zone u tim satima imaju porast prosječne brzine. A, u jutarnjim satima vidi se pad brzine ispod 50% od referente brzine što je srednje zagušenje, Tablica 9.



Grafikon 7. Usporedna analiza indeksa pada brzine za sve zone

5.3 Estimacija prometnih zagušenja pomoću pokazatelja *low-speed proportion*

5.3.1 Pokazatelj *low-speed proportion*

Pomoću pokazatelja *low-speed proportion* mogu se dobiti podaci u različitim vremenskim intervalima ako se poznaje brzina vozila i vrijeme trajanja putovanja:

$$R_T = 1 - \frac{T_D}{T_T} \quad (5.3)$$

gdje je T_D vrijeme putovanja pri malim brzinama, a T_T ukupno vrijeme putovanja. Veličine koje teže prema 1 definiraju manje zagušenje ili da nema zagušenja, a one koje teže prema 0 definiraju zagušenje. Estimacija je izvršena na način da su se u svim zonama kao male brzine definirale one brzine koje su prosječne po ruti manje od 20 km/h.. Vrijeme putovanja za te rute uzeto je kao vrijeme putovanja pri malim brzinama, a ukupno vrijeme putovanja je definirano kao ukupna vremena putovanja svih ruta u jednom satu. Vrijednosti pokazatelja *low-speed proportion* prikazane su na grafu prema:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N R_T}{N} \quad (5.4)$$

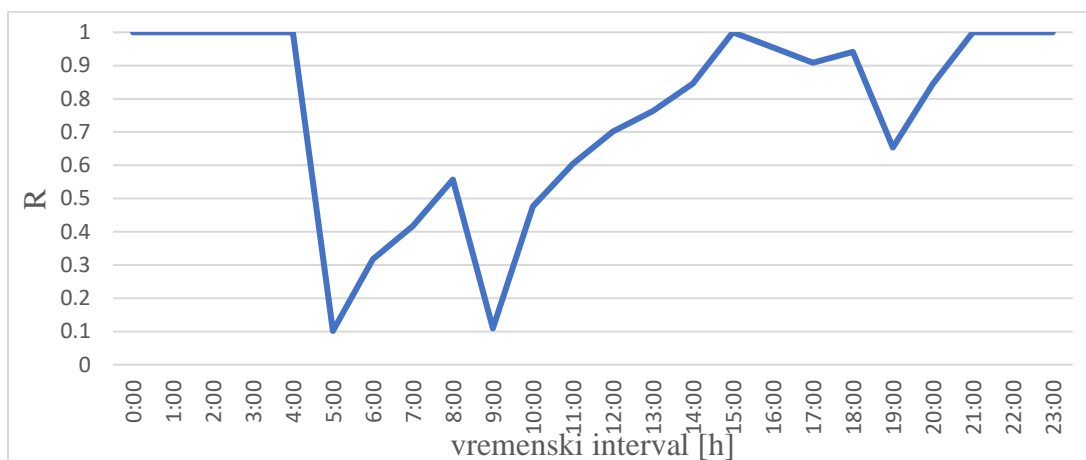
gdje je $\sum_{i=1}^N R_T$ suma svih R_T u satu, a N ukupan broj izračunatih R_T u satu. Za prikaz vrijednosti R po satima iskorištena je integrirana funkcija alata Microsoft Excel - SUMIF, Kod 3.

$$R = 1 - ((\text{SUMIF}(\$I\$7:\$I\$27,N7,\$H7:\$H\$27))/(\text{SUMIF}(\$G\$2:\$G\$548,07,\$H\$2:\$H\$548)))$$

Kod 3. Primjer izračuna indeksa R za jedan sat

5.3.2 Zona1 – estimacija

Zapadni dio grada, odnosno Zona1 je isto tako najopterećenija u jutarnjim satima, Grafikon 8. Estimacija zagušenja za Zonu1 pomoću pokazatelja *low-speed proportion*. Vidljivo je da se brzine tijekom dana postupno povećavaju. Prema tome jedan od zaključaka je da veći broj vozila ulazi/izlazi u grad u ovoj zoni ujutro nego popodne.

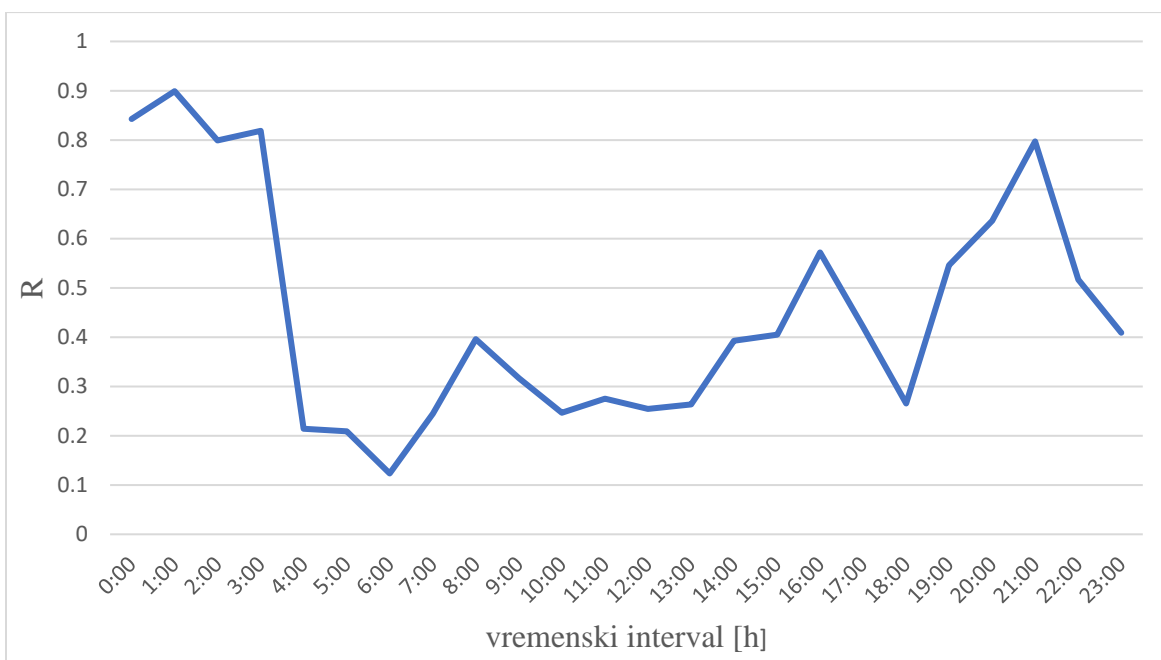


Grafikon 8. Estimacija zagušenja za Zonu1 pomoću pokazatelja *low-speed proportion*

5.3.3 Zona2 – estimacija

Druga zona odnosno zona koja se nalazi u središtu grada ima manje odstupanja tijekom dana, kao što je bilo i vidljivo u prvom pokazatelju, Grafikon 9. Kao male brzine za ovu zonu definirane su prosječne brzine koje su manje od 20 km/h.

U periodu od 6 h do 7 h omjer vremena putovanja pri malim brzinama iznosi skoro 90% ukupnog vremena putovanja. To razdoblje može se definirati kao najveće zagušenje. Također, graf prikazuje da u su ovoj zoni većina brzina tijekom dana male brzine, osim u ranim jutarnjim i kasnim satima, Grafikon 9.

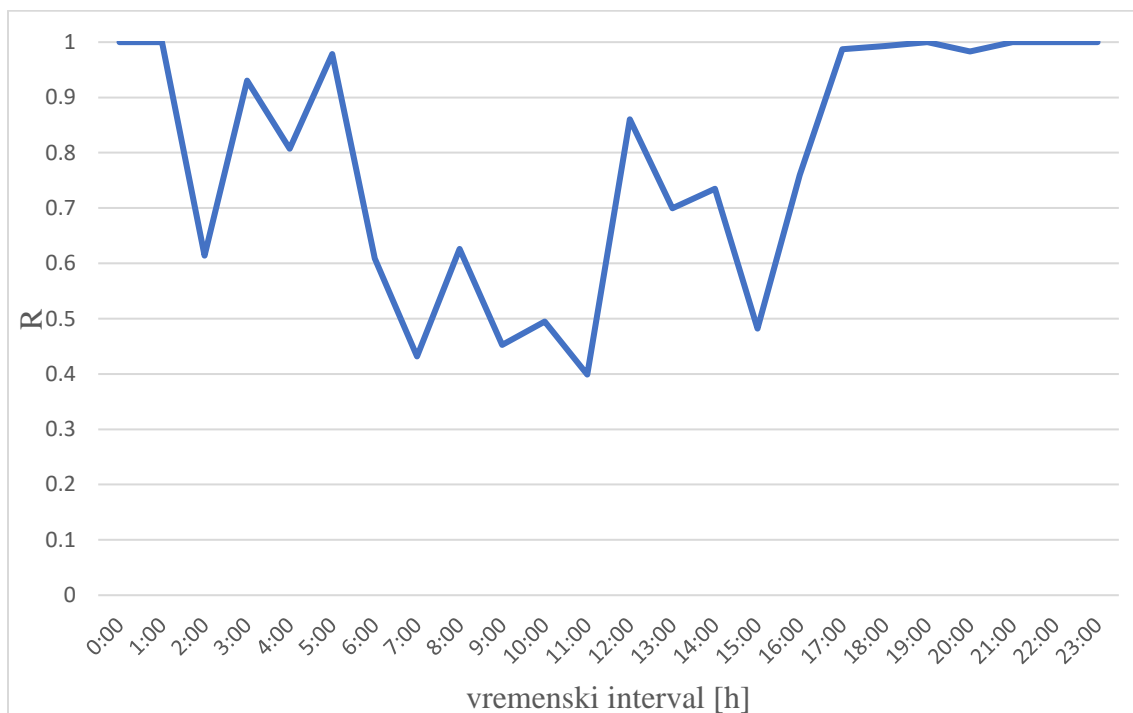


Grafikon 9. Raspodjela zagušenja tijekom dana za Zonu2 pomoću *low-speed proportion* pokazatelja

5.3.4 Zona3 – estimacija

U istočnoj Zoni 3 provedena je analiza na istom skupu podataka kao i u prvom slučaju. Kao i prethodno za male brzine su se definirale sve prosječne brzine vozila na ruti koje su manje od 20 km/h. Može se zaključiti da je najveće zagušenje u Zoni 3 u periodu od 6 h pa sve do 11 h. Isto

tako u razdoblju od 15 h do 16 h vidi se veliki pad u vremenu putovanja, odnosno da je skoro 70% svih putovanja pri malim brzinama u tom periodu, Grafikon 10.

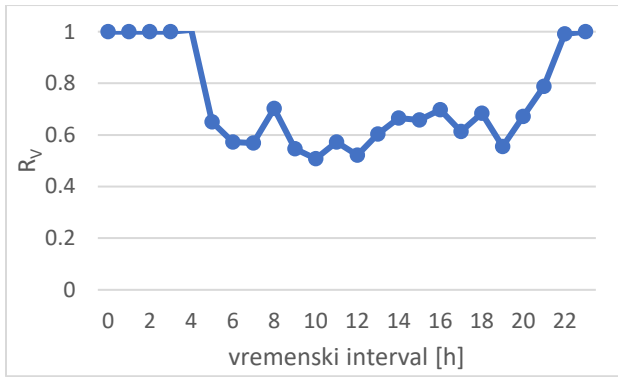


Grafikon 10. Raspodjela prometnog zagušenja u 24-satnom intervalu pomoću pokazatelja *low-speed proportion*

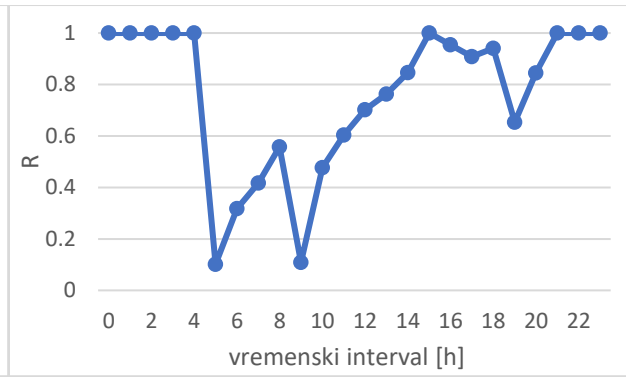
5.4 Usporedba estimacije prometnog zagušenja različitim pokazateljima

U Zoni3, kada se pogledaju oba pokazatelja (Grafikon 11, c), vide se najsličniji uzorci u oscilacijama. Jutarnji period od 6 h do 11 h prema oba pokazatelja je zagašen, a prema R pokazatelju čak 70%-80% svih brzina su male brzine. U Zoni2 usporedbom pokazatelja vide se razlike u oscilacijama od ponoći pa sve do jutra. Tomu je razlog što su skoro sve prosječne brzine u tom razdoblju veće od 20 km/h, odnosno nisu definirane kao male brzine, Grafikon 11, b). Dok su u Zoni1 jasno vidljivi slični padovi i vrhovi na grafu kada se usporede pokazatelji. Vide se sličnosti u razdoblje od 4:30 h do 6 h, razdoblju od 7 h do 9 h, i kasnije kroz dan vidi se rast prosječne brzine u omjeru na referentnu, odnosno smanjenje zagušenja, Grafikon 11, c).

a) Zona1

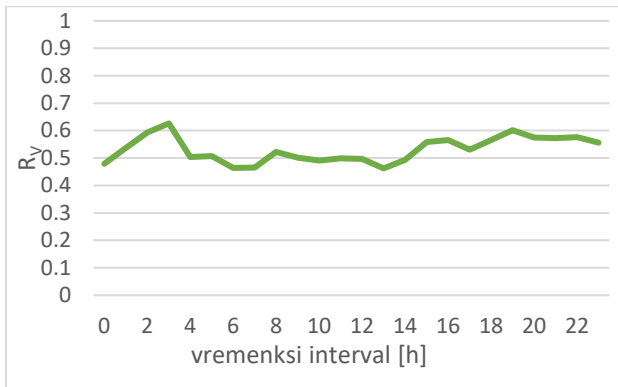


Rv

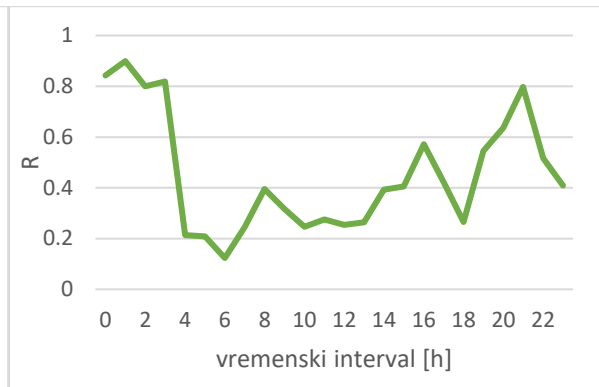


R

b) Zona2

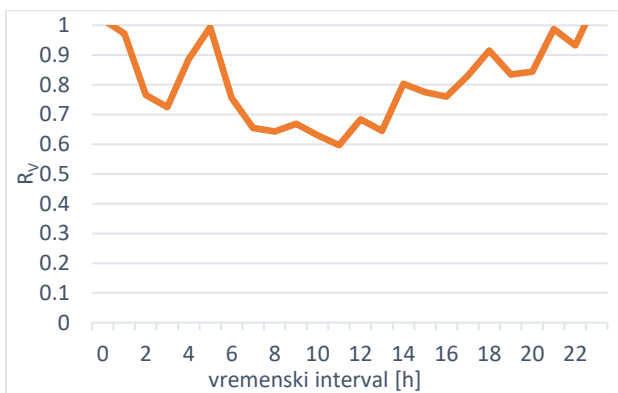


Rv

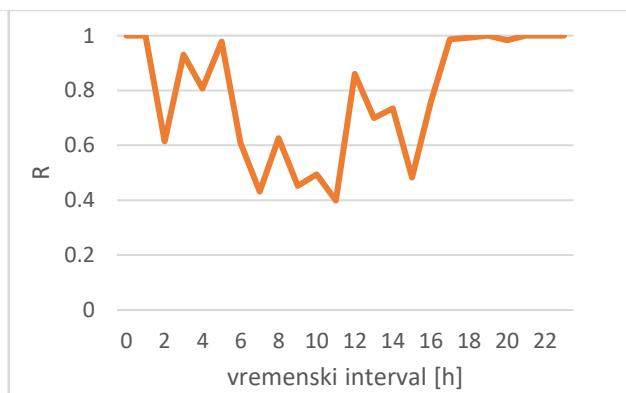


R

c) Zona3



Rv



R

Grafikon 11. Usporedba svih grafova za oba pokazatelja

6 ZAKLJUČAK

Prometno zagušenje ima svakodnevni utjecaj na promet u gradskim područjima. Uzrok tomu posljednjih desetljeća je urbanizacija i povećanje broja vozila. U području prometnog zagušenja svakodnevno se vrše različita znanstvena istraživanja. Od utjecaja prometnog zagušenja na okoliš i ljude, do prikazivanja načina kako smanjiti prometno zagušenje. Mnoga istraživanja pokušavaju estimirati zagušenje, odnosno pomoću različitih pokazatelja želi se predvidjeti kretanje zagušenja u gradskim područjima.

Kategorizacija prometnog zagušenja doprinosi boljem uvidu u uzroke i posljedice zagušenja. Fizička i operacijska uska grla jedno su od najčešćih uzroka zagušenja. Ograničenost prostora pogotovo u gradovima, centri koji privlače veliku količinu ljudi, te prometni incidenti samo su od nekih utjecaja na prometno zagušenje, tj. na stvaranje uskog grla. Svi ti utjecaji mogu se ogledati kroz posljedice prometnog zagušenja. Oblici posljedica su razni, a mogu se kategorizirati kao posljedice vezane za vozilo, ljude, okoliš, i gospodarstvo.

Indikatori prometnog zagušenja prikazuju stanje prometne mreže, odnosno utjecaj prometnog zagušenja na prometnu mrežu. Indikatori se mogu vezati za brzinu vozila, kašnjenje, razinu uslužnosti i dr.

Danas, tehnologije kojima se omogućuje prikupljanje potrebnih podataka za estimaciju prometnog zagušenja ili nekog drugog parametra funkcioniraju na različitim principima. Svaka od tehnologija ima svoje prednosti i mane prilikom prikupljanja podataka. GNSS tehnologija omogućuje najširu primjenu zbog velikog broja uređaja koji posjeduju GNSS tehnologiju, a npr. Bluetooth tehnologija omogućuje mjerenje drugih parametara poput zauzeća ili broja vozila na određenom presjeku što se ne može postići GNSS tehnologijom.

U radu korišteni pokazatelji indeksa pada brzine u omjeru na referentnu brzinu i pokazatelj omjera vremena putovanja pri malim brzinama i ukupnog vremena trajanja putovanja, estimiraju zagušenje u jutarnjim satima kao najveće, za što se može pretpostaviti da je uzrokovano dolaskom ljudi na posao ili škole (dnevne migracije).

Prednosti pokazatelja prikazanih u radu su:

- zagušenje se može estimirati po različitim vremenskim intervalima (sat, dan, tjedan, i sl.);
- potreban mali broj parametara kako bi se estimacija izvršila – brzina i vrijeme trajanja putovanja;
- brz i kvalitetan uvid u stanje prometnog toka;
- pokazatelji se mogu koristiti u kombinaciji s drugim metodama kako bi se dobio bolji uvid u stanje na prometnoj mreži ili dionici.

Oba pokazatelja prikazana u radu sadrže nedostatke koje je potrebno uzeti u obzir:

- prometno zagušenje prikazano je općenito za prometnu mrežu (3 zone);
- nema dovoljno podataka u određenim vremenskim periodima (stanje u analizi ne odgovara u potpunosti stvarnoj slici);
- ne može se dobiti stvarna slika o broju vozila na prometnici.

Potrebno je naglasiti da se prometno zagušenje u gradu Deutschlandsbergu javlja samo u jutarnjim satima, što nije u skladu s uobičajenim obrascima pojavljivanja zagušenja kao u velikim gradovima (jutarnje i popodnevno vršno opterećenje). A, razlog tomu vjerojatno je veličina i oblik grada, te broj stanovnika.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] tomtom, "tomtom," tomtom , [Online]. Available: https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/. [Accessed 15 srpanj 2020].
- [2] L. Tišljarić, T. Carić, B. Abramović and T. Fratrović, "Traffic State Estimation and Classification on Citywide Scale Using Speed Transition Matrices," *Sustainability*, vol. 12, 2020.
- [3] EC, "Sustainable Urban Mobility European450 Policy Practice and Solutions," 2020.
- [4] A. Chow, A. Santacreu, I. Tsapakis, G. Tanasaranond and T. Cheng, "Empirical Assessment of Urban Traffic Congestion," *Journal of Advanced Transportation*, p. 1000–1016, 2014.
- [5] Cambridge Systematics, Inc, "Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation," Federal Highway Administration, Cambridge, Massachusetts , 2005.
- [6] N. Servos, X. Liu, M. Teucke and M. Freitag, "Travel Time Prediction in a Multimodal Freight Transport Relation Using Machine Learning Algorithms," *Logistics 2019*, 2019.
- [7] Pun-Cheng, "An Interactive Web-Based Public Transport Enquiry System With Real-Time Optimal Route Computation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 983-988, 2012.
- [8] W.-X. Wang, R.-J. Guo and J. Yu, "Research on road traffic congestion index based on comprehensive parameters: Taking Dalian city as an example," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10(6), pp. 1-8, 2018.
- [9] X. Y. Y. L. Feifei He, "A Traffic Congestion Assessment Method for Urban Road Networks Based on Speed Performance Index," *Procedia Engineering 137*, pp. 425-433, 2016.
- [10] E. H. J. S. A.L. Kok, "Vehicle routing under time-dependent travel times: the impact of congestion avoidance," *Operational Methods for Production and Logistics*, Enschede, Nizozemska, 2012.
- [11] European Ministers of Transport, "MANAGING URBAN TRAFFIC CONGESTION," OECD Publishing 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16, Francuska, Pariz, 2007.
- [12] D. Brčić, L. Šimunović and M. Slavulj, "Upravljanje prijevoznom potražnjom u gradovima," Fakultet prometnih znanosti , Zagreb, 2016.
- [13] J. C. Falcocchio and H. S. Levinson, *Road Traffic Congestion: A Concise Guide*, Springer International Publishing Švicarska, 2015.

- [14] ECLAC, Traffic Congestion The Problem and How to Deal With It, Santiago: Ujedinjeni Narodi, 2003.
- [15] T. Piyushimita and T. Nebiyou, "Incorporating Weather Information into Real-Time Speed Estimates: Comparison of Alternative Models," *Journal of Transportation Engineering*, pp. 379-389, 2012.
- [16] I. Dadić, G. Kos and M. Ševrović, Teorija prometnog toka, Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, 2014.
- [17] "National Marine Electronics Association," National Marine Electronics Association, [Online]. Available: <https://www.nmea.org>. [Accessed 21 srpanj 2020].
- [18] K. Ozbay and P. Kachroo, Incident Management in Intelligent Transportation Systems, Norwood, MA: Artech House Publishers, 1999.
- [19] A. C. McKinnon, D. Y. Ge and D. McClelland, "Assessment of the Opportunities for Rationalising Road Freight Transport in the UK Food Supply Chain," Logistics Research Centre, Heriot-Watt University, 2003.
- [20] N. Jelusić, "Telematička sučelja (nastavni tekst)," Fakultet prometnih znanosti, Zagreb.
- [21] M. Muštra, "Lokacijski i navigacijski sustavi - nastavni tekst," Fakultet prometnih znanosti, Zagreb.
- [22] E. G. N. S. S. Agency, "European Global Navigation Satellite Systems Agency," European Global Navigation Satellite Systems Agency, [Online]. Available: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>. [Accessed 02 kolovoz 2020].
- [23] Z. Yan, J. A. Fraireyz, K. Zhao, H. Yanx, P. G. Madoeryy, W. Li and H. Yangx, "Distributed Contact Plan Design for GNSSs," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019.
- [24] Central Research Institute for Machine Building, "INFORMATION AND ANALYSIS CENTER FOR POSITIONING, NAVIGATION AND TIMING," Central Research Institute for Machine Building, [Online]. Available: <https://www.glonass-iac.ru>. [Accessed 01 rujan 2020].
- [25] "European Space Agency," gnss science support centre, [Online]. Available: <https://gssc.esa.int>. [Accessed 20 srpanj 2020].
- [26] "BeiDou Navigation Satellite System," BeiDou Navigation Satellite System, [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn>. [Accessed 20 srpanj 2020].
- [27] O. Altintasia, H. Tuydes-Yamanb and K. Tuncay, "Detection of urban traffic patterns from Floating Car Data (FCD)," *Transportation Research Procedia* 22, p. 382–391, 2017.

- [28] J. T. Penttinen, *The Telecommunications Handbook: Engineering Guidelines for Fixed, Mobile and Satellite Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [29] "Combain poistioning solutions," Combain poistioning solutions, [Online]. Available: <https://combain.com>. [Accessed 11 rujan 2020].
- [30] F. Menese and A. Moreira, "Using GSM CellID Positioning for Place Discovering," 2007.
- [31] A. Bensky, *Short-range Wireless Communication (Third Edition)*, Elsevier , 2019.
- [32] sparkfun, "sparkfun," [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com>. [Accessed 12 rujan 2020].
- [33] L. Klinkusoom, C. Aswakul and P. Janpugdee, "Bluetooth Sensors for Vehicular Traffic Monitoring," in *The 29th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications*, Phuket, Thailand, 2014.
- [34] C. Patel and D. Shah, "Automatic Number Plate Recognition System (ANPR): A Survey; Atul Patel," *International Journal of Computer Applications* , vol. Volume 69– No.9, 2013.
- [35] Teltonika, "Teltonika: Telematics Wiki Knowledge Base," Teltonika, [Online]. Available: <https://wiki.teltonika-gps.com>. [Accessed 29 kolovoz 2020].
- [36] PostgreSQL Tutorial, "PostgreSQL Tutorial," PostgreSQL Tutorial, [Online]. Available: <https://www.postgresqtutorial.com>. [Accessed 02 rujan 2020].
- [37] Springer Link, "Springer Link," [Online]. Available: <https://link.springer.com/>. [Accessed 14 rujan 2020].

POPIS ILUSTRACIJA

Slika 1. Usko grlo pri fizičkom smanjenju prometnice	9
Slika 2. Uska grla kod skretanja s kratkim trakama za skretanje.....	9
Slika 3. Raskrižje s izmaknutim sporednim privozima	10
Slika 4. Emisije ispušnih plinova u Ujedinjenom Kraljevstvu – 2005	15
Slika 5. Raspored satelita po orbitalnim ravninama kod GPS sustava	26
Slika 6. Raspored satelita po orbitalnim ravninama za sustav GLONASS	28
Slika 7. Oblici mobilne ćelije.....	34
Slika 8. AoA - primjer dvije metode za određivanja pozicije vozila.....	36
Slika 9. Sustav za detektiranje prometnih parametara pomoću Bluetooth tehnologije	37
Slika 10. Teltonika FMA110 uređaj za praćenje	40
Slika 11. Primjer <i>reporta</i> za isctavanje ruta vozila i tablice s vrijednostima za svaku rutu	43
Slika 12. Definirane zone unutar grada - a) Zona1, b) Zona2 i c) Zona3	46
Slika 13. Primjer obrade podataka u programskom alatu Microsoft Excel	47
Slika 14. Zona3 – istočni dio grada	49
Grafikon 1. Postotak prometnog zagušenja po uzrocima prometnog zagušenja - SAD.....	6
Grafikon 2. Postotak zagušenja po uzroku zagušenja - Njemačka	7
Grafikon 3. Postotak prometnog zagušenja – Pariz	7
Grafikon 4. Raspodjela indeksa zagušenja po satima za Zonu1	48
Grafikon 5. Raspodjela indeksa zagušenja u Zoni2 – centar grada	49
Grafikon 6. Raspodjela indeksa zagušenja u 24 satnom intervalu.....	50
Grafikon 7. Usporedna analiza indeksa pada brzine za sve zone	51
Grafikon 8. Estimacija zagušenja za Zonu1 pomoću pokazatelja <i>low-speed proportion</i>	52
Grafikon 9. Raspodjela zagušenja tijekom dana za Zonu2 pomoću <i>low-speed proportion</i> pokazatelja	53
Grafikon 10. Raspodjela prometnog zagušenja u 24-satnom intervalu pomoću pokazatelja <i>low-speed proportion</i>	54
Grafikon 11. Usporedba svih grafova za oba pokazatelja	55

POPIS TABLICA I KODOVA

Tablica 1. Utjecaj različitih vremenskih promjena na brzinu	12
Tablica 2. Posljedice prometnog zagušenja	14
Tablica 3. Pokazatelji prometnog zagušenja.....	21
Tablica 4. Dijelovi NMEA poruke i njihov opis.....	29
Tablica 5. Primjer GPX poruke	30
Tablica 6. Prednosti i nedostaci FCD tehnologije naspram drugi detektora prometnog toka	32
Tablica 7. Primjer sirovog podataka	41
Tablica 8. Primjer obrađenih podataka za Zonu2	45
Tablica 9. Indeks pada brzine, [9].....	47
Kod 1. Primjer pred-obrade podataka za Zonu2.....	44
Kod 2. Primjer funkcija za izračun pokazatelja R_v u jednom satu.....	47
Kod 3. Primjer izračuna indeksa R za jedan sat.....	52



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ diplomski rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ diplomskog rada
pod naslovom **ESTIMACIJA PROMETNIH ZAGUŠENJA URBANIH PODRUČJA**

TEMELJENA NA POKRETNIM OSJETILIMA

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 9/18/2020 _____

Student/ica:

(potpis)