

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Doktorska disertacija

**UČINKOVITO RASPROSTIRANJE PORUKA U
MREŽAMA VOZILA ZASNOVANO NA NJIHOVOM
POLOŽAJU**

Josip Balen

Osijek, 2014.

Ova doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za programsko inženjerstvo Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku.

Mentor: prof. dr. sc. Goran Martinović

Doktorska disertacija ima 151 stranicu.

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. dr.sc. Goran Martinović, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Osijek
2. dr.sc. Drago Žagar, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Osijek
3. dr.sc. Željko Hocenski, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Osijek
4. dr.sc. Mario Žagar, red. prof. Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb
5. dr.sc. Alfonzo Baumgartner, docent Elektrotehničkog fakulteta Osijek

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. dr.sc. Goran Martinović, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Osijek
2. dr.sc. Drago Žagar, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Osijek
3. dr.sc. Željko Hocenski, red. prof. Elektrotehničkog fakulteta Osijek
4. dr.sc. Mario Žagar, red. prof. Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb
5. dr.sc. Alfonzo Baumgartner, docent Elektrotehničkog fakulteta Osijek

Datum obrane doktorske disertacije: 2. listopad 2014. godine

Za moje anđele, Josipu i Filipu! Hvala vam, bez vas ne bih uspio!

ACKNOWLEDGEMENTS

Koosha, my colleague, co-mentor, co-supervisor and, most importantly, my friend and kum, simply thank you! Thank you for sharing your knowledge with me, giving me a huge support in my research work and always patiently explaining me the principles of VANETs, programming languages and everything else. Without you, learning VANETs would have been much harder and boring. I really enjoyed our collaboration and at some times it was on a really high level!

Yolande, thank you for giving me the opportunity to come to Leuven and become a part of your team and department. Every time I felt like home. You and your team motivated me to start my research in VANETs field and I learned a lot from you.

There is something special in Leuven, my friends: Arun (Apu), Irma, Jan, Jef, Vladimir, Hakan, Theo, Dimitar (x2), Zubair, Ivan, Mattia, Carlo... it was a pleasure to meet you and I hope that we will meet some time again.

Dimitrikos, kume, I did not forget you ☺. Living with you was an amazing experience for me and I enjoyed every second of our friendship.

But if prof. Martinović did not hire me, my story would have gone in a different direction. I am very happy that you gave me an opportunity to become a scientist and your assistant. Thank you for supporting me in my research work and my ideas.

My life motto is: Pretty people don't succeed, persistent ones do!

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	Algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovan na njihovom trenutnom položaju	3
1.2.	Model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju	4
1.3.	Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila.....	5
1.4.	Pregled po poglavljima	6
2.	AD-HOC MREŽE VOZILA – VANETS	7
2.1.	Mobilne ad-hoc mreže	7
2.1.1.	Isprepletene mreže.....	8
2.1.2.	Bežične senzorske mreže.....	9
2.1.3.	Oportunističke mreže	9
2.1.4.	Mreža usmjerena prema ljudima	9
2.2.	Inteligentni transportni sustavi	10
2.3.	Komunikacija u ad-hoc mrežama vozila	12
2.3.1.	Razašiljanje	13
2.3.2.	Geografsko razašiljanje.....	13
2.3.3.	Usmjeravanje temeljno na topologiji	13
2.3.4.	Usmjeravanje temeljno na položaju.....	14
2.3.5.	Usmjeravanje temeljno na nakupini čvorova.....	14
2.3.6.	Prilagodljivo usmjeravanje i usmjeravanje svjesno konteksta	15
2.4.	Karakteristike i namjena ad-hoc mreža vozila.....	15
2.5.	Usluge i aplikacije u ad-hoc mrežama vozila	17
3.	ALGORITAM ZA UČINKOVITO RASPROSTIRANJE PORUKA U POKRETNIM MREŽAMA VOZILA ZASNOVAN NA NJIHOVOM TREUTNOM POLOŽAJU	20
3.1.	Metode razašiljanja za rasprostiranje poruka	22
3.1.1.	Klasično poplavljanje porukama	22
3.1.2.	Problem oluje razašiljanja	23
3.2.	Tehnike sprječavanja oluje razašiljanja	25
3.2.1.	Statična vjerojatnost razašiljanja poruka	25
3.2.2.	Dinamično razašiljanje poruka	30
3.2.3.	Pristupi u rješavanju problema oluje razašiljanja prema njihovom usmjerenju.....	33
3.2.4.	Smanjivanje broja razašiljanih poruka.....	37
3.3.	Opis korištenja V2V modela komunikacije u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka	

3.3.1.	Odabir <i>beacon</i> intervala za V2V model komunikacije u algoritmu	40
3.3.2.	Metoda usmjerena prema pošiljatelju	45
3.3.3.	BackUp metoda usmjerena prema primatelju	50
3.4.	Opis korištenja SCF modela komunikacije u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka	57
3.4.1.	Tehnike usmjeravanja u DTN mrežama	58
3.4.2.	Pregled metoda sa SCF modelom komunikacije u ad-hoc mrežama vozila	60
3.4.3.	Izmjena poruka u SCF modelu komunikacije	62
3.4.4.	Metode za upravljanje lokalnim spremnikom poruka	64
3.4.5.	Određivanje <i>beacon</i> intervala za SCF model komunikacije	65
3.5.	Određivanje gustoće prometa u ad-hoc mrežama vozila	70
3.5.1.	Pregled literature za određivanje gustoće u ad-hoc mrežama vozila	70
3.5.2.	Definiranje metode za izračun gustoće prometa u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka	71
3.5.3.	Određivanje granice gustoće vozila na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela	81
3.5.4.	Analitički način određivanja granice gustoće vozila na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela	82
3.6.	Vrednovanje performansi algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka	85
3.6.1.	Grafički prikaz funkcionalnosti algoritma	85
3.6.2.	Simulacijski rezultati i vrednovanje performansi algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka	87
4.	MODEL UČINKOVITOG RASPROSTIRANJA PORUKA KORIŠTENJEM VOZILA U MIROVANJU	96
4.1.	Motivacija za korištenje vozila u mirovanju za učinkovito rasprostiranje poruka	96
4.2.	Pregled literature za rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju	98
4.3.	Studija parkiranja u naseljenim područjima	100
4.4.	Karakteristike akumulatora u vozilima	101
4.5.	Primjena modela za učinkovito rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju	102
4.6.	Opis V2PV modela komunikacije	106
4.6.1.	Metoda prepoznavanja Scenarija 1, 2 i 4	107
4.6.2.	Metoda prepoznavanja Scenarija 3	108
4.6.3.	Metoda prepoznavanja Scenarija 5	110
4.7.	Vrednovanje performansi modela za učinkovito rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju	110
5.	METODA EVALUACIJE POSTUPAKA RASPROSTIRANJA PORUKA U STVARNOJ OKOLINI MREŽA VOZILA	119
5.1.	Eksperimenti velikih razmjera s ad-hoc mrežama vozila u stvarnom svijetu	119
5.2.	Korištenje pametnih mobilnih uređaja u ad-hoc mrežama vozila	121

5.3.	Osnovne karakteristike mobilnih tehnologija	123
5.3.1.	Android platforma	124
5.4.	Opis metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila	125
5.4.1.	Zahtjevi na metodu evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila	126
5.4.2.	Tehničke karakteristike predložene metode.....	127
5.4.3.	Okvir za evaluaciju različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini	129
5.4.4.	Opis funkcionalnosti predložene metode	133
5.4.5.	Osnovne programske metode	136
5.4.6.	Koraci za primjenu predložene metode	137
5.4.7.	Parametri za vrednovanje postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila	138
5.4.8.	Okolina za primjenu predložene metode	139
5.5.	Ekperimentalne postavke i mjerila vrednovanja	139
5.5.1.	Ekperimentalne postavke pametnih mobilnih uređaja	140
5.5.2.	Ekperimentalne postavke i mjerila vrednovanja Ping-Pong eksperimenta	141
5.5.3.	Ekperimentalne postavke i mjerila vrednovanja VANET eksperimenta	142
5.6.	Ekperimentalni rezultati i analiza	143
5.6.1.	Ping-Pong eksperiment	144
5.6.2.	VANET eksperiment.....	146
6.	ZAKLJUČAK.....	149
	LITERATURA.....	152
	POPIS SLIKA	158
	POPIS TABLICA.....	161
	POPIS ALGORITAMA	162
	SAŽETAK.....	163
	ABSTRACT	164
	ŽIVOTOPIS.....	165
	Prilog I.....	166

1. UVOD

*Now I think there's a vision here, a new technology,
and I'm really looking forward to a time
when generations after us look back at us and say:
"How ridiculous it was that humans were driving cars."*

prof. dr. Sebastian Thrun
Stanford University

Zamislite svijet u kojemu su vozila opremljena brojnim sensorima i mogu komunicirati s drugim vozilima i infrastrukturom. U takvom bi svijetu vozači bili automatski obaviješteni o svim bitnim događajima na cesti i oko nje. Vozila bi razmjenjivala poruke o brzini, lokaciji, smjeru kretanja, kočenju, gužvama, prometnim uvjetima (snijegu, ledu, magli, kiši) i sl. te na temelju tih podataka upozorila ostala vozila na potencijalne i stvarne opasnosti i tako bi se spriječile prometne nesreće. Vozila bi komunicirala i s infrastrukturom poput informacijskih centara, semafora, prometnih znakova i tako bi promet postao sigurniji i učinkovitiji. Vozila većeg prioriteta, kao što su vozila hitne pomoći, policije i vatrogasaca, najavila bi svoju rutu kretanja, prilagodila bi svoj tok prometa i tako se brže i sigurnije kretala gradskim područjima. Gregory D. Winfree iz američkog zavoda za istraživanje i inovacije u transportu rekao je: „*Posljednjih 50 godina istraživali smo kako možemo preživjeti prometne nesreće, a sljedećih 50 godina istraživat ćemo kako ih spriječiti*“.

Opisani nas svijet očekuje vrlo brzo jer brz napredak u razvoju ugrađenih tehnologija omogućuje da vozila budu opremljena s uređajima OBU (engl. *On-Bord Units*) koji posjeduju sposobnosti bežične komunikacije i obrade podataka. Te karakteristike omogućuju razvoj inteligentnih transportnih sustava koji se temelje na suvremenim računalnim i komunikacijskim tehnologijama. Inteligentni transportni sustavi predstavljaju nadogradnju na klasični prometni i transportni sustav, a cilj im je postizanje sigurnog, pouzdanog i učinkovitog prijevoza putnika i roba. Zbog ogromnog potencijala i svestrane primjene, inteligentni transportni sustavi zadnjih nekoliko godina postaju primarno područje istraživanja mnogih znanstvenika. Inteligentni transportni sustavi zahtijevaju učinkovitu razmjenu informacija između vozila za kreiranje korisnih i upotrebljivih telemetričkih aplikacija za rad u promjenjivim okolinama velikih razmjera. Postoje brojne aplikacije koje se koriste za različite namjene poput unaprjeđivanja sigurnosti prometa (izbjegavanje sudara, obavijesti o nesrećama), povećanja učinkovitosti vožnje (nadzor zagušenja prometa, rezerviranje slobodnih parkirnih mjesta) te za komercijalne

usluge (zabavu, posao). Za većinu je aplikacija ključno da dostave pravu informaciju u pravo vrijeme i na pravo mjesto kako bi se mogle donijeti informirane odluke. Nadalje, od sustava ugrađenih u vozila zahtijeva se da opažaju, upravljaju i prenose prometne informacije. To je dovelo do razvoja ad-hoc mreža vozila, tj. VANETs (engl. *Vehicular Ad-Hoc Networks*).

Ad-hoc mreže vozila imaju vrlo dinamičnu i neuravnoteženu mrežnu topologiju zbog toga što se čvorovi (vozila) konstantno i brzo kreću. Bežična se komunikacija u ad-hoc mrežama vozila odvija pomoću standarda DSRC (engl. *Dedicated Short Range Communication*) koji radi na 5.9 GHz i ima maksimalni domet od 1000 m. On omogućava razmjenu informacija između vozila u V2V (engl. *Vehicle-to-Vehicle*) modelu komunikacije i razmjenu informacija između vozila i infrastrukture u V2I (engl. *Vehicle-to-Infrastructure*) modelu komunikacije. Općenito, komunikacija se može postići jednostrukim skokom (engl. *1-hop*) izravno između dvaju čvorova ili višestrukim skokovima (engl. *multi-hop*), tj. neizravno kroz više od dva čvora. Na temelju zahtjeva aplikacija komunikacija može biti reaktivna ili proaktivna. U reaktivnoj se komunikaciji podaci šalju samo na temelju zahtjeva i upita, a u proaktivnoj komunikaciji čvorovi automatski razasijavaju poruke čak i ako drugi čvorovi ne zahtijevaju informacije. Zbog svoje se dinamičnosti ad-hoc mreže vozila često svrstavaju u podskupinu MANET-a (engl. *Mobile Ad-Hoc Network*), ali ad-hoc mreže vozila posjeduju jedinstvene karakteristike koje ih razlikuju od drugih bežičnih mreža, a to su:

- potencijalno su velikih razmjera
- kratkotrajne su, jako dinamične i pokretne
- nemaju ograničen izvor napajanja
- mogu imati visoke računalne performanse
- poznat uzorak kretanja
- poznata svojstva čvorova.

Rad na disertaciji u ovom području potaknut je suradnjom s KU Leuven u Belgiji te se djelomično nastavlja na njihova do sada ostvarena istraživanja. Njihov se trenutni rad, opisan u [1], [2], [3], [4], [5], [6] i [7], temelji na optimizaciji rasprostiranja podataka u ad-hoc mrežama vozila s mehanizmom grupiranja vozila koji je temeljen na kontekstu informacija i zajedničkim interesima vozila. Kontekst informacija odnosi se na prostorno-vremenske karakteristike vozila poput lokacije, smjera, brzine i vremena. Svaka grupa je predstavljena vozilima s posebnim odgovornostima koja određuju koje kontekstne informacije mogu biti raspodijeljene unutar grupe i između grupa. Eksperimenti i simulacije velikih razmjera na stvarnim prometnim podacima pokazuju da njihov kontekstualno zasnovan mehanizam

grupiranja značajno smanjuje ukupni mrežni promet, protok beznačajnih i zalihosnih informacija te opće troškove obrade informacija. Unatoč prednostima komunikacije temeljene na grupiranju i kontekstu informacija, u ovoj se disertaciji ne koristi grupiranje vozila nego su vozila tijekom komunikacije u potpunom ad-hoc načinu rada što im daje veću slobodu u odlučivanju o rasprostiranju poruka te je svako vozilo zasebno i ne ovisi o drugim vozilima. Također, kontekst informacija nije razmatran jer se istraživanje u disertaciji provodi na višoj razini (aplikacijskoj) u kojoj ovakve informacije nisu uključene. Simulacije u [2] pokazuju da postoji značajan broj vozila koji su daleko od gustih prometnih područja i nisu u kontaktu s drugim vozilima. Ta su vozila sama u svojoj grupi i budući da nisu povezana s ostatkom vozila, ne mogu sudjelovati u širenju informacija. Vozila mogu doći u kontakt s ostalim vozilima nakon nekog vremena, ali sve informacije koje su primili dok su bili nepovezani izgubljene su jer ne postoji spremnik poruka u vozilima.

Navedeni se problem može riješiti korištenjem SCF (engl. *Store-Carry-Forward*) modela komunikacije koji sprema, prenosi i prosljeđuje poruke. SCF model komunikacije sastoji se od čvorova s dvosmjernim vezama koje mogu biti prekinute zbog neke greške ili kretanja čvorova. Kada su dva čvora povezana, imaju priliku razmijeniti podatke, a kada nisu, čvorovi spremaju podatke u privremeni spremnik (engl. *buffer*) i razmjenjuju ih kada dođu u kontakt s drugim čvorovima. Ovaj se model još naziva DTN (engl. *Delay Tolerant Networking*) model jer tolerira kašnjenja i prekide u mreži. Upravo ove karakteristike nedostaju u mehanizmu grupiranja navedenom ranije. Dodavanjem SCF modela komunikacije koji tolerira kašnjenja uz V2V model komunikacije povećat će pokrivenost i širenje informacija na manje prometna područja koja imaju ograničenu komunikaciju i nisu povezana s drugim dijelovima mreže. Očekivani izvorni znanstveni doprinosi ove disertacije su:

1. Algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovan na njihovom trenutnom položaju
2. Model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju
3. Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila.

1.1. Algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovan na njihovom trenutnom položaju

U prvom izvornom znanstvenom doprinosu razvijen je i implementiran hibridni algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila koji kombinira V2V i SCF komunikacijske modele za rješavanje trenutnih problema u komunikaciji između vozila, kao

što su slaba geografska skalabilnost, loša informacijska pokrivenost u manje prometnim područjima, i koji omogućuje inteligentno i pravovremeno širenje informacija u okolinama s gustim prometom. U okolinama s gustim prometom za brzo rasprostiranje informacija uz što manje opterećenje mreže i što manji broj zalihosnih poruka korištene su dvije metode. Prva metoda usmjerena prema pošiljatelju temelji se na korištenju *beacon* poruka (malih pozdravnih poruka) pomoću kojih su vozila pošiljatelji svjesna svoje okoline. Pošiljatelji odabiru četiri najpovoljnija susjeda prema njihovom položaju i broju susjeda koji V2V modelom komunikacije dalje razasijaju poruke. Ovakvim je načinom komunikacije osigurano razasijanje poruka u svim smjerovima te je značajno smanjeno opterećenje mreže jer umjesto da sva vozila razasijaju dobivenu novu poruku, kao što je to slučaj u klasičnom poplavljanju (engl. *flooding*) porukama, samo četiri odabrana čvora sudjeluju u komunikaciji. Druga BackUp metoda usmjerena prema primatelju aktivira se ako je neki od odabranih vozila razasijaljača (engl. *broadcasters*) zakazao i nije razasijao poruku. Razvijena je i implementirana i učinkovita metoda za određivanje gustoće prometa i granice na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela iz V2V u SCF i obratno. Dodavanjem SCF modela komunikacije povećava se širenje i pokrivenost informacija i sprječava se gubitak važnih informacija uzrokovan prekidima i dijeljenima mreže. Dio ovog doprinosa objavljen je u radu [8].

1.2. Model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju

U drugom je izvornom znanstvenom doprinosu unaprijeđen predloženi algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka koji je razvijen u prvom doprinosu. U slučaju male gustoće prometa mogu se primijeniti V2I i SCF komunikacijski modeli kako bi učinkovitije rasprostirali poruke u mreži, no oba komunikacijska modela imaju nedostatke. V2I oblik komunikacije daje vrlo mala kašnjenja, ali zahtijeva infrastrukturu čija su implementacija i održavanje skupi i dugotrajni te ju kontroliraju operateri, a SCF oblik komunikacije ne treba infrastrukturu, ali se zbog pohranjivanja i prenošenja poruka značajno povećava vrijeme kašnjenja. Zbog činjenice da su vozila u prosjeku parkirana više od 23 sata na dan (preko 95% ukupnog vremena), potrebno ih je iskoristiti za komunikaciju i kada nisu u pokretu. Za parkirana vozila karakteristično je da se nalaze u velikom broju na malom prostoru, dugotrajno borave na istom mjestu, imaju široku raspodjelu i nalaze se na specifičnim i unaprijed poznatim lokacijama. Nadalje, akumulatori u vozilima imaju veliki kapacitet koji može omogućiti OBU da radi čak i tjedan dana do potpunog pražnjenja akumulatora što parkiranim vozilima omogućuje da

sudjeluju u komunikaciji. Parkirana vozila zbog svoje statičnosti omogućuju bolju optimizaciju i bolje korištenje resursa od vozila koja se kreću, mogućnost zamjene infrastrukture do neke mjere te nisku cijenu implementacije.

Takva vrsta komunikacije koja uključuje parkirana vozila predstavlja hibridnu komunikaciju V2V i V2I modela jer parkirana vozila predstavljaju statične čvorove u V2V komunikaciji. Ipak, s obzirom da parkirana vozila nisu potpuno stabilne cestovne jedinice, ne mogu u potpunosti zamijeniti cestovnu infrastrukturu, ali mogu poslužiti kao privremena zamjena ili podrška infrastrukturi. U sljedećim scenarijima predloženi model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju poboljšava komunikaciju i pokrivenost mreže:

- tijekom noći i za vrijeme vrlo male gustoće prometa
- u prigradskim područjima
- za zaobilaženje prepreka i gradskih blokova
- nakon početne primjene ad-hoc mreža vozila
- u podzemnim garažama.

U ovom je doprinosu predložen novi model komunikacije pod nazivom V2PV (engl. *Vehicle-to-Parked-Vehicle*) koji ima sljedeće prednosti: malo kašnjenje, povezivanje nepovezanih dijelova mreže, povećavanje gustoće vozila u scenarijima s rijetkim prometom na cestama i nema potrebu za korištenjem infrastrukture. Dio ovog doprinosa objavljen je u [9].

1.3. Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila

Treći izvorni znanstveni doprinos rješava problem testiranja i vrednovanja razvijenih aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u stvarnom svijetu. Testiranje performansi razvijenih protokola i aplikacija uobičajeno se vrši korištenjem različitih simulatora ad-hoc mreža vozila. Iako oni mogu simulirati promet s visokim stupnjem stvarnosti, postoje čimbenici iz stvarnog svijeta (nepredvidive situacije, vremenski utjecaji, stvarne prepreke i sl.) koji se teško mogu stvarno simulirati, a utječu na mobilnost i mrežni promet. Da bi vrednovanje svakog novog rješenja za ad-hoc mreže vozila bilo što vjerodostojnije, performanse bi trebalo testirati u stvarnom okruženju, no to je trenutno gotovo nemoguće. Razlozi su što je potreban veliki broj vozila koji su opremljeni s uređajima OBU koji imaju komunikacijske i računalne sposobnosti, a njihova je implementacija skupa i komplicirana i teško bi bila provediva na velikoj skali s velikim brojem vozila u različitim uvjetima i okolinama. Javlja se potreba za jednostavnijim i

pristupačnijim načinom testiranja razvijenih aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u stvarnom svijetu. Stoga je predložena metoda koja koristi pametne mobilne uređaje u ad-hoc načinu rada kao čvorove u ad-hoc mrežama vozila koji emuliraju uređaje OBU u vozilima. Da bi implementacija koda iz simulatora bila što jednostavnija, razvijena je mobilna platforma otvorenog izvornog koda (engl. *open source*) koja koristi metodologiju Veins simulatora. Predložena metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila zbog malog je komunikacijskog dometa pogodna za testiranje aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u scenariju naseljenih gradskih i prigradskih područja u kojima postoji puno prepreka koje smanjuju domet signala uređaja OBU kako bi on bio približno jednak dometu bežičnog signala pametnih mobilnih uređaja. Dio ovog doprinosa objavljen je u radu [10].

1.4. Pregled po poglavljima

Prvo poglavlje daje uvod u temu disertacije te ukratko opisuje izvorne znanstvene doprinose. U drugom su poglavlju opisane ad-hoc mreže vozila, tj. VANETs, njihove karakteristike, oblici komunikacije te su grupirane najznačajnije usluge i aplikacije. Prikazan je pregled sličnih mobilnih ad-hoc mreža i opis inteligentnih transportnih sustava. Treće poglavlje opisuje algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila koji koristi V2V i SCF modele komunikacije za što učinkovitije rasprostranjivanje poruka. Nadalje, opisana je i metoda za definiranje gustoće vozila i granica na kojim dolazi do promjene između ovih dvaju komunikacijskih modela. Provedene su opsežne simulacije i vrednovanje algoritma i dokazana je njegova učinkovitost u smislu smanjivanja kašnjenja i opterećenja mreže te povećanje pokrivenosti mreže porukama. U četvrtom je poglavlju predstavljen model učinkovitog rasprostiranja poruka u ad-hoc mrežama vozila korištenjem vozila u mirovanju. Opisane su prednosti korištenja vozila u mirovanju i scenariji u kojima ovaj model daje najbolje performanse. Rezultati dobiveni iz simulacija pokazuju da se korištenjem znatno manjeg broja vozila u mirovanju u odnosu na ukupan prosječan broj parkiranih vozila u gradskim okolinama u ad-hoc komunikaciji značajno unaprjeđuje učinkovitost rasprostiranja poruka tako što se povećava pokrivenost mreže porukama, smanjuju se kašnjenja u dostavljanju poruka i osigurava se značajno veći domet poruka. Peto poglavlje opisuje metodu evaluacije protokola i aplikacija u stvarnom svijetu korištenjem pametnih mobilnih uređaja. Opisana je i mVANET mobilna Android aplikacija otvorenog izvornog koda koja omogućuje testiranje u stvarnom svijetu i jednostavno prenošenje koda iz Veins simulatora. Zaključak ove disertacije donesen je u šestom poglavlju.

2. AD-HOC MREŽE VOZILA – VANETS

Veliki napredak u razvoju sklopovlja, aplikacija i komunikacijskih tehnologija omogućuje kreiranje i implementiranje mnogobrojnih i raznovrsnih tipova mreža u različitim okolinama. Prva ad-hoc mreža koja je razvijena bila je mobilna ad-hoc mreža MANET iz koje su se razvile brojne popularne mreže poput isprepletene (engl. *mesh*), senzorske, oportunističke (engl. *opportunistic*) i ad-hoc mreže vozila. Mreža koja se razvila u zadnjem desetljeću i koja je pobudila veliki interes automobilske industrije i brojnih znanstvenika je ad-hoc mreža vozila – VANET. Područje ad-hoc mreža vozila postalo je vrlo aktivno područje znanstvenih istraživanja, standardizacije i razvoja jer ima ogroman potencijal da poveća sigurnost vozila i cesta, učinkovitost prometa, kvalitetu vožnje i udobnost vozača i putnika. Ad-hoc mreže vozila imaju vrlo dinamičnu i neuravnoteženu mrežnu topologiju zbog toga što se čvorovi (vozila) konstantno i brzo kreću. Komunikacija je podložna stalnim prekidima i kašnjenjima jer često dolazi do prekida mreže i dijeljenja na manje cjeline. Učinkovito je rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila veliki izazov i upotrebljavaju se različiti pristupi za pravovremeno propagiranje hitnih informacija, pokrivanja velikog geografskog područja, omogućavanje učinkovite komunikacije u mrežama s malom gustoćom prometa i sprječavanje širenja nebitnih informacija. Najnoviji istraživački trendovi temelje se na razvoju kvalitetnih algoritma i protokola za komunikaciju između vozila te na njihovoj stvarnoj implementaciji. Preduvjet za primjenu i implementaciju komunikacijskih algoritma i protokola je da vozila budu opremljena s uređajima OBU koji posjeduju sposobnosti bežične komunikacije i obrade podataka. Te karakteristike omogućuju razvoj inteligentnih transportnih sustava koji se temelje na suvremenim računalnim i komunikacijskim tehnologijama i koji mogu biti primijenjeni u svim vrstama transporta poput cestovnog, željezničkog, zračnog, pomorskog i riječnog transporta. Ad-hoc mreže vozila se primjenjuju u cestovnom prometu i uključuju sve vrste vozila koja se kreću cestama, RSUs i cestovnu infrastrukturu.

2.1. Mobilne ad-hoc mreže

Mobilno ad-hoc umrežavanje razvilo se u devedesetim godinama prošloga stoljeća s pojavom bežičnih tehnologija koje su omogućile izravno povezivanje između korisničkih uređaja, a to su [11]:

- Bluetooth: IEEE 802.15.1 za osobne mreže (engl. *personal area networks*)
- 802.11 standard: Za bežične (engl. *Local Area Network*) mreže LAN velikih brzina.

Ova dva standarda omogućuju izravnu komunikaciju između mrežnih uređaja koji su u komunikacijskom dometu bez potrebe za korištenjem infrastrukture. Nadalje, omogućavanjem višestrukih skokova omogućeno je komuniciranje između bilo koja dva čvora u mreži. To je dovelo do pojave mreža MANET u kojima čvorovi kooperativno surađuju i prenose poruke do drugih čvorova te omogućuju drugim čvorovima pristup infrastrukturi i Internetu. Budući da trenutni Internet protokoli nisu bili pogodni za korištenje u nepredvidivoj i dinamičnoj MANET topologiji, došlo je do razvoja novih protokola, reaktivnih poput DYMO i proaktivnih poput protokola OLSRv2. Iznad protokola IP MANET koristi transportne protokole TCP i UDP (engl. *User Datagram Protocol*). Protokol UDP je zbog svojih karakteristika pogodniji za korištenje. Iz MANET mreža razvile su se nove vrste mreža poput isprepletenih mreža, ad-hoc mreža vozila, oportunističkih mreža, senzorskih mreža i mreža usmjerenih prema ljudima koje su trenutno i popularnije od mreže MANET zbog sljedećih strategija razvoja:

- razvoj prema primjeni: prvo se identificiraju scenariji primjene i nakon toga se počinje s tehničkim rješenjima
- smanjenje složenosti: ovisno o scenariju uklanjaju se neka MANET ograničenja
- fokusirano istraživanje: istražuju se teme bitne za izgradnju robusne i učinkovite mreže koje podržavaju određene scenarije primjene
- korištenje kvalitetnih simulacijskih modela: da bi se dobili vjerodostojni rezultati, potrebno je testirati razvijena rješenja u simulatorima koji što stvarnije simuliraju okolinu u kojoj će algoritmi i protokoli biti korišteni
- izrada stvarne mrežne okoline: u eksperimentima treba testirati protokole u stvarnoj okolini i sa stvarnim korisnicima.

2.1.1. Isprepletene mreže

Isprepletene mreže predstavljaju fleksibilan i pristupačan dodatak Internetu koji je popularan na razini gradova u urbanim područjima i nudi različite usluge poput nadzora sigurnosti i inteligentnog transporta. Bežična struktura mreže s višestrukim skokovima formira se s namjenskim ili fiksnim bežičnim isprepletenim usmjerivačima koji komuniciraju pomoću višestrukih skokova. Neki usmjerivači rade kao izlazni čvorovi (engl. *gateway*) koji omogućuju isprepletenoj mreži spajanje na Internet i na ostale mreže.

2.1.2. Bežične senzorske mreže

Bežične senzorske mreže mogu se primijeniti u različitim scenarijima, a razvijene su za kontroliranje i nadgledanje različitih pojava i događaja. U području nadzora čvorovi se raspoređuju slučajno ili planski te mogu komunicirati međusobno i prenositi prikupljene informacije preko višestrukih skokova do izlaznog čvora koji je spojen na Internet ili neku drugu mrežu. Najnovija su istraživanja usmjerena ka energetskej učinkovitosti, bežičnim senzorskim mrežama s robotima, podvodnim bežičnim senzorskim mrežama i korištenjem pametnih mobilnih uređaja kao ljudskih senzora.

2.1.3. Oportunističke mreže

Oportunističke mreže iskorištavaju mobilnost kao prednost za kreiranje novih kontakata između čvorova kako bi se spojili dijelovi mreže koji su udaljeni i nisu povezani. Nadalje, oportunističke mreže toleriraju kašnjenja što znači da čvorovi mogu pohraniti poruke, prenositi ih te ih razmijeniti s drugim čvorovima kada dođu u komunikacijski domet. Za razliku od mreža MANET, poruke se između čvorova mogu dostaviti iako ne postoji putanja između njih (engl. *end-to-end path*). Stoga su oportunističke mreže pogodne za komunikaciju u prožetim (engl. *pervasive*) okolinama zasićenim s uređajima gdje je mreža podijeljena na manje dijelove koji nisu povezani. Glavni pravci istraživanja odnose se na kreiranje modela kretanja, protokole usmjeravanja i učinkovito rasprostiranje informacija.

2.1.4. Mreža usmjerena prema ljudima

Budući da veliki broj ljudi posjeduje pametne mobilne uređaje koje nose uvijek sa sobom, moguće je iskoristiti njihove senzore i komunikacijske sposobnosti za kreiranje mreže u kojoj su ljudi u središtu pozornosti. Budući da su noviji pametni mobilni uređaji opremljeni s brojim sensorima moguće je, bez postavljanja senzorske mreže, kreirati mrežu koja će opažati događaje iz stvarnog svijeta i širiti informacije o tim događajima kroz mrežu. Te se informacije mogu iskoristiti i za praćenje ljudskog ponašanja i navika na temelju kojih se mogu donijeti važne odluke. Pametni se mobilni uređaji mogu iskoristiti i za kreiranje mobilnog računarstva u oblaku tako da se resursi pametnih mobilnih uređaja dijele međusobno između uređaja u komunikacijskom dometu. To dovodi do puno boljeg iskorištenja resursa pametnih mobilnih uređaja i smanjuje potrebu za infrastrukturom.

2.2. Inteligentni transportni sustavi

Razvoj je inteligentnih transportnih sustava potaknut brzim razvojem tehnologije i sve većim potrebama za učinkovitim transportom. Povećana potreba za mobilnošću dovela je do značajne promjene transportne infrastrukture. Ipak, gradovi su sve više pretrpani vozilima što dovodi do svakodnevne gužve, zagušenja prometa, nepredvidivih prometnih situacija te prometnih nesreća. Neučinkovitost prometa uzrokuje značajne gubitke vremena, smanjuje sigurnost vozila i pješaka, uzrokuje veliko zagađenje i veliki gubitak energije dobivene iz goriva. Inteligentni transportni sustavi predstavljaju nadogradnju na klasični prometni i transportni sustav, a cilj im je postizanje sigurnog, pouzdanog i učinkovitog prijevoza putnika i roba. Temelje se na učinkovitoj razmjeni informacija između vozila za kreiranje korisnih i upotrebljivih telemetričkih aplikacija za rad u promjenjivim okolinama velikih razmjera. Postoje brojne aplikacije koje se koriste za različite namjene poput unaprjeđivanja sigurnosti prometa (izbjegavanje sudara, obavijesti o nesrećama), povećanja učinkovitosti vožnje (nadzor zagušenja prometa, rezerviranje slobodnih parkirnih mjesta) te za komercijalne usluge (zabava, posao). Većini je aplikacija ključno da dostave pravu informaciju u pravo vrijeme i na pravo mjesto kako bi se mogle donijeti informirane odluke. Inteligentni transportni sustavi obuhvaćaju sve vrste transporta, cestovni, željeznički, zračni, pomorski i riječni (slika 2.1 [12]), a u ovoj se disertaciji istražuju ad-hoc mreže vozila u cestovnom transportu.



Slika 2.1. Inteligentni transportni sustavi [12]

Tablica 2.1. Standardi DSRC-a u Japanu, Europi i SAD-u

	Japan (ARIB)	Europa (CEN)	SAD (ASTM)
Komunikacija	Dvosmjerna neistodobna (engl. <i>half-duplex</i>) za OBU i dvosmjerna (engl. <i>full-duplex</i>) za RSU	Dvosmjerna neistodobna	Dvosmjerna neistodobna
Radio frekvencija	5.8 Ghz	5.8 Ghz	5.9 Ghz
Širina frekvencijskog područja	80 Mhz	20 Mhz	75 Mhz
Kanali	7	4	7
Razdvajanje kanala	5 Mhz	5 Mhz	10 Mhz
Brzina prijenosa	Veza preuzimanja/podizanja (engl. <i>down/up link</i>): 1 ili 4 Mbps	Veza preuzimanja; 500 Kbps	Veza preuzimanja /podizanja: 3-27 Mbps
Domet	30 m	15-20 m	1000 m

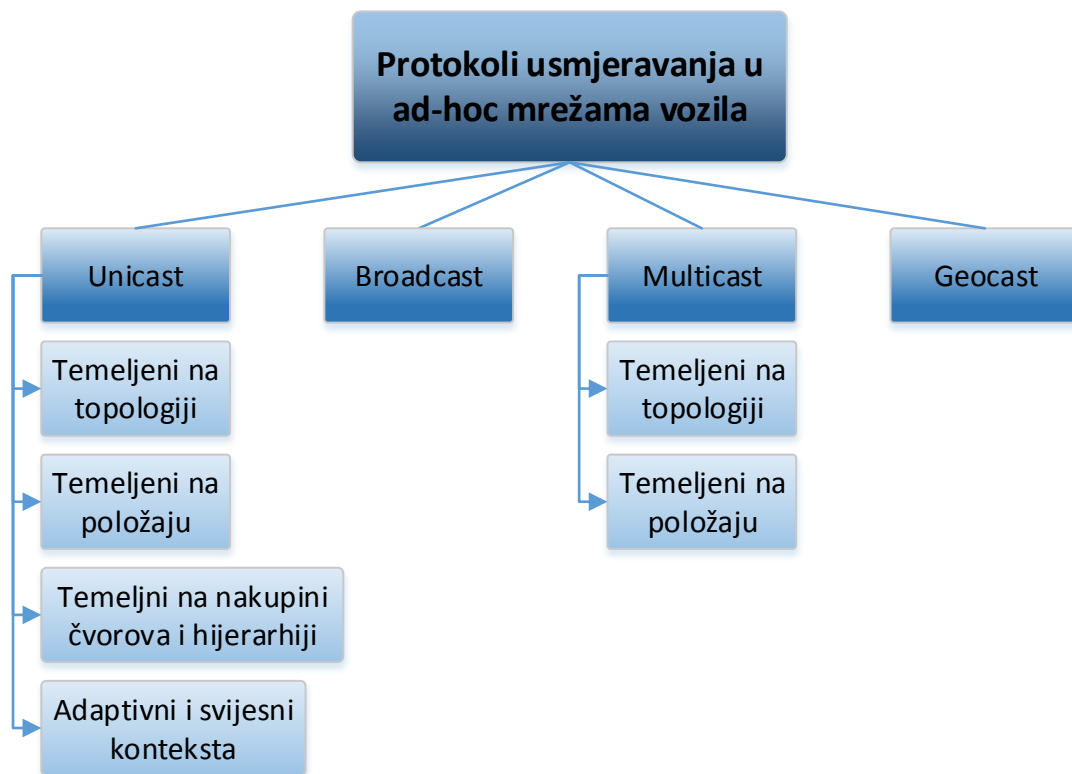
Od sustava ugrađenih u vozila zahtijeva se da opažaju, upravljaju i prenose prometne informacije. Tehnologije koje su korisne za razvoj inteligentnih transportnih sustava su:

- GPS (engl. *Global Positioning System*): korištenjem ugrađenih modula GPS u uređajima OBU moguće je primiti signal s različitih satelita i odrediti trenutnu poziciju vozila. GPS radi s preciznošću od 10 m što je dovoljno za većinu primjena
- DSRC: DSRC je jednosmjernan ili dvosmjernan bežični komunikacijski kanal koji radi na bežičnom spektru od 5.8 ili 5.9 GHz i posebno je dizajniran za upotrebu u cestovnom prometu. Najveći je problem kod korištenja komunikacijskog kanala DSRC postojanje različitih standarda u Europi, SAD-u i Japanu kao što je prikazano u tablici 2.1. Koristi se za V2V i V2I komunikaciju, komunikaciju sa semaforima, elektronički sustav naplate, pružanje informacija itd.
- bežične mreže: koriste se za brzu komunikaciju između čvorova koji mogu biti vozila i infrastruktura
- mobilna podatkovna mreža: 3G i 4G standardi mogu se koristiti za prijenos informacija između aplikacija. Iako je pokrivenost vrlo velika, zahtijeva dodatni trošak i mobilna je podatkovna mreža spora te nije pogodna za vremenski kritične i sigurnosne aplikacije
- kamere uz cestu: mogu se koristiti za prepoznavanje vozila pomoću tehnologije OCR (engl. *Optical Character Recognition*) koja se koristi za prepoznavanje tablica na automobilima i omogućuje automatsku naplatu korištenja neke ceste ili kazne
- inteligentno vozilo: vozila bi trebala automatski skupljati informacije pomoću ugrađenih senzora i onda ih razasijati drugim vozilima ili infrastrukturi. U vozila je

moгуće ugraditi senzore za kišu, snijeg, led, maglu, prepoznavanje naglog koćenja i sudara. Zadnjih je nekoliko godina veliki napredak postignut i u području samoupravljanjućih vozila bez vozača, a prvi je takav automobil razvio Google koji je u svibnju 2012. godine dobio dozvolu za vožnju u američkoj državi Nevada [13].

2.3. Komunikacija u ad-hoc mrežama vozila

Jedan je od najvećih izazova u razvoju ad-hoc mreža vozila osigurati učinkovitu komunikaciju u dinamičnoj okolini ad-hoc mreža vozila koja je puna prekida i nepovezanih dijelova mreže. Stoga su razvijeni brojni protokoli usmjeravanja (engl. *routing*) koji su grupirani kao što je prikazano na slici 2.2. Protokoli usmjeravanja u kategorijama pojedinačnog razošiljanja (engl. *unicast*) i višeodredišnog razošiljanja (engl. *multicast*) prikladniji su za korisnički usmjerene aplikacije, geografsko razošiljanje (engl. *geocast*) i razošiljanje (engl. *broadcast*) za sigurnosno usmjerene aplikacije, poput sigurnosnih upozorenja i upravljanja prometom u određenom geografskom području, te samo razošiljanje za kritične sigurnosne obavijesti i slanje *beacon* poruka [14]. U doprinosima disertacije koriste se pojedinačno i višeodredišno razošiljanje, a najviše usmjeravanje razošiljanjem.



Slika 2.2. Protokoli usmjeravanja u ad-hoc mrežama vozila

2.3.1. Razašiljanje

Razašiljanje je jedan od najčešće korištenih protokola koji razašilja informacije svim primateljima u komunikacijskom dometu. Ako je potrebno dostaviti poruke čvorovima koji nisu u komunikacijskom dometu, koristi se opće razašiljanje s višestrukim skokovima koje radi po principu poplavlivanja mreže porukama. Razašiljanje se koristi kada se želi brzo rasprostrirati poruke po mreži. Takvo je „slijepo“ rasprostiranje poruka vrlo zahtjevno u smislu propusnosti, uzrokuje zagušenje komunikacijskog kanala i koliziju paketa. Ovo je posebno izraženo u mrežama s većom gustoćom čvorova jer postoji više čvorova u blizini koji izvrše ponovno razašiljanje iste poruke. Ovaj je problem poznat pod nazivom oluja razašiljanja (engl. *broadcast storm*).

2.3.2. Geografsko razašiljanje

Geografsko se razašiljanje može opisati kao višeodredišno razašiljanje temeljno na položaju. Cilj je geografskog razašiljanja dostavljanje poruke s čvora na kojemu je nastala do svih čvorova unutar određenog geografskog područja ili ZOR-a (engl. *Zone Of Relevance*). U geografskom razašiljanju čvorovima izvan ZOR-a se ne dostavljaju poruke kako bi se izbjegle nepotrebne brzoplete reakcije. Uobičajeno se definira zona razašiljanja u kojoj se usmjerava poplavlivanje porukama kako bi se smanjili opći troškovi poruke i zagušenost mreže koji uzrokuju klasično poplavlivanje porukama. U blizini odredišta može se primijeniti pojedinačno razašiljanje kako bi se razašiljali paketi. Problemi su geografskog razašiljanja dijeljenje mreže na nepovezane dijelove i nepovoljni susjedi koji mogu spriječiti pravilno rasprostiranje poruka kroz mrežu.

2.3.3. Usmjeravanje temeljno na topologiji

Usmjeravanje temeljeno na topologiji koristi informacije o mrežnoj topologiji poput znanja o postojećim vezama koje su pohranjene u tablicama usmjeravanja kako bi uspostavilo najbolje rute za razašiljanje podataka od izvora do odredišta. Usmjeravanje temeljeno na topologiji može se podijeliti na proaktivne, reaktivne i hibridne pristupe. U proaktivnom pristupu svaki čvor izmjenjuje znanje o topologiji tako da dijeli vlastite tablice usmjeravanja sa susjedima. Tu se pojavljuje problem velikih općih troškova zbog periodnog prijenosa informacija i problem zastarjelih informacija zbog veoma mobilne okoline. Reaktivni protokoli rješavaju problem velikih općih troškova tako da zadržavaju samo one rute koje su trenutno aktivne. Ukoliko nema dostupnih ruta, čvor mora provesti postupak otkrivanja ruta prije nego pošalje poruku s izvora

prema odredištu. Tada se pojavljuju velika kašnjenja dok se ne uspostavi komunikacijski proces i niski omjer dostave paketa PDR (engl. *Packet Delivery Ratio*) kada su izvorni i odredišni čvor daleko jedan od drugoga jer se vjerojatnost prekida rute povećava s promjenom brzine i velikom mobilnošću ad-hoc mreža vozila. Hibridni pristup kombinira proaktivni i reaktivni pristup. ZRP (engl. *Zone Routing Protocol*) je hibridni protokol koji ograničava domet proaktivnog pristupa samo na susjedne čvorove, a koristi reaktivni pristup za traženje željenog čvora ispitivanjem odabranih čvorova umjesto da šalje upit svim čvorovima u mreži.

2.3.4. Usmjeravanje temeljno na položaju

Usmjeravanje temeljeno na položaju zahtijeva dodatne informacije poput geografske pozicije čvorova koja se može dobiti korištenjem GPS-a. Protokoli koji koriste usmjeravanje temeljno na položaju pogodni su za korištenje u ad-hoc mrežama vozila jer ne zahtijevaju uspostavljanje i održavanje ruta. Put usmjeravanja se određuje se u trenutku kada se trebaju proslijediti poruke. Čvorovi znaju položaj odredišnog čvora što im pomaže da donesu najbolju odluku o usmjeravanju. U nekim protokolima čvorovi proaktivno poplavljuju mrežu s porukama o vlastitom položaju što dozvoljava ostalim čvorovima da izgrade kompletnu bazu s podacima o položajima svih čvorova u mreži. Moguće je reaktivno poplaviti mrežu ili određeno područje s upitima o položaju kada se želi naći pozicija odredišnog čvora. Drugi pristup je GLS (engl. *Grid Location Service*) koji se sastoji od jednake raspodjele lokacijskih usluga između čvorova, tj. lokacijskih poslužitelja. Ostale komponente koje određuju protokole usmjeravanja su slanje *beacon* poruka kako bi se dobile informacije o susjedima, razošiljanje, strategije oporavka i odabir puta.

2.3.5. Usmjeravanje temeljno na nakupini čvorova

Usmjeravanje temeljno na nakupini čvorova (engl. *cluster*) kreira virtualnu mrežnu infrastrukturu kroz grupiranje čvorova kako bi se postigla skalabilnost, snažna povezanost i pouzdana mreža. Načelo čvora je zamijenjeno s nakupinom čvorova prema kojoj se protokoli usmjeravanja mogu isto izravno primijeniti. CBRP (engl. *Cluster-Based Routing Protocol*) definira glavu (engl. *cluster head*) nakupine čvorova koja je odgovorna za funkcije upravljanja unutar nakupine čvorova gdje čvorovi komuniciraju s izravnom vezom i između pojedinih nakupina čvorova pomoću izlaznog čvora. Cilj je smanjiti oluju razošiljanja i opće troškove poruka te povećati omjer uspješno dostavljenih paketa jer su samo glave nakupina čvorova i izlazni čvorovi odgovorni za usmjeravanje, kontrolu i ažuriranje poruka. Vrlo dinamična mreža

čini odabir glava i upravljanje nakupinama čvorova vrlo izazovno jer se vozila pridružuju i napuštaju nakupine čvorova nasumično na temelju situacije u prometu i topologije cesta. Usmjeravanje temeljno na nakupinama čvorova može postići dobru skalabilnost, bolju kvalitetu veza i pouzdanost za velike mreže, ali u mrežama koje se brzo mijenjaju, kašnjenje i opći troškovi u formiranju i održavanju tih nakupina čvorova predstavljaju velike izazove.

2.3.6. Prilagodljivo usmjeravanje i usmjeravanje svjesno konteksta

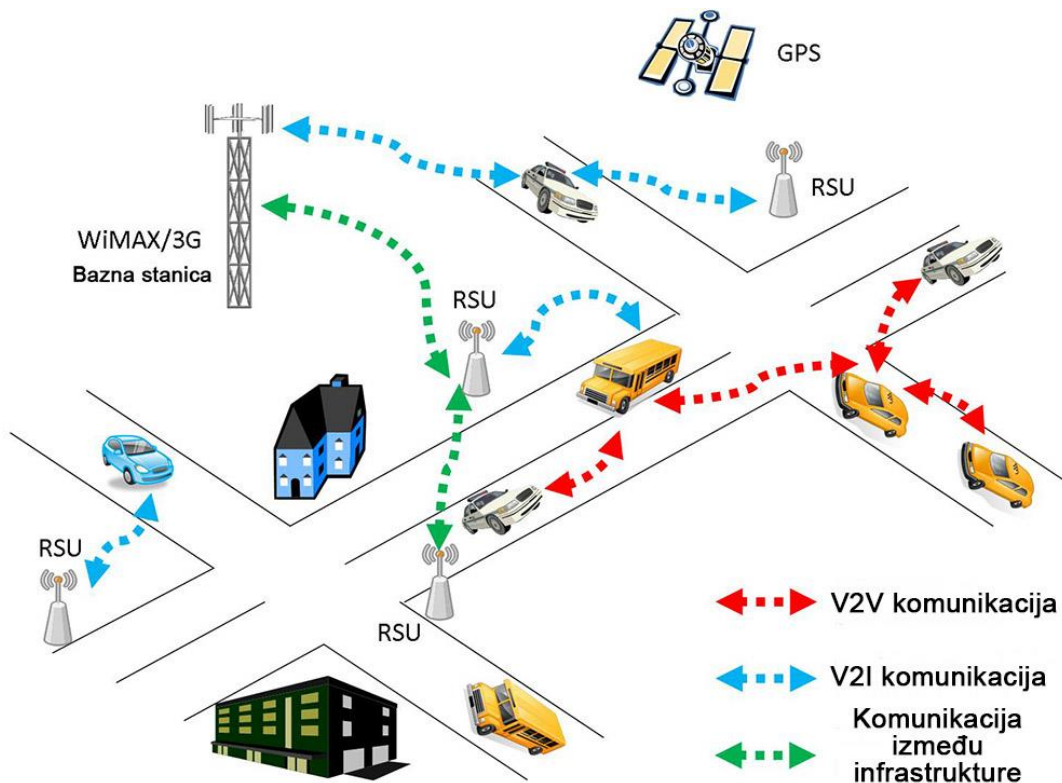
Protokoli prilagodljivog usmjeravanja i usmjeravanja svjesnog konteksta prilagođavaju parametre usmjeravanja na temelju kontekstualnih informacija koje se odnose na mrežne uvjete. Tako na primjer ACAR (engl. *Adaptive Connectivity Aware Routing*) modelira prijenosnu kvalitetu svakog dijela ceste i prilagodljivo odabire sljedeći skok na temelju mogućnosti da smanji PER cijele rute. TAPR (engl. *Traffic Adaptive Packet Relaying*) uvodi prilagodljivi mehanizam koji odlučuje hoće li usmjeravanje ići kroz nakupine čvorova koje surađuju na usmjeravanju ili kroz odabir sljedećeg čvora.

2.4. Karakteristike i namjena ad-hoc mreža vozila

Ad-hoc mreže vozila imaju vrlo dinamičnu i neuravnoteženu mrežnu topologiju zbog toga što se čvorovi, odnosno vozila konstantno i brzo kreću. Bežična se komunikacija u ad-hoc mrežama vozila odvija korištenjem standarda DSRC koji omogućava razmjenu informacija između vozila u V2V modelu komunikacije i razmjenu informacija između vozila i infrastrukture u V2I modelu komunikacije (slika 2.3). Komunikacija može biti izravna između dvaju čvorova koji su u komunikacijskom dometu jednostrukim skokom ili neizravna višestrukim skokovima između dvaju čvorova koji nisu u komunikacijskom dometu. Na temelju zahtjeva aplikacija komunikacija može biti reaktivna ili proaktivna. U reaktivnoj se komunikaciji podaci šalju samo na temelju zahtjeva i upita dok u proaktivnoj komunikaciji čvorovi automatski razasiljaju poruke čak i ako drugi čvorovi ne zahtijevaju informacije. Ad-hoc mreže vozila nastale su kao podskupina mobilnih mreža vozila MANETs i posjeduju jedinstvene karakteristike koje ih razlikuju od drugih bežičnih mreža, a to su:

- potencijalno su velikih razmjera – mogu imati neograničen broj korisnika i mogu se teorijski proširiti preko cijelog kontinenta
- kratkotrajne su, jako dinamične i pokretne – vozila se mogu kretati i brzinama većim od 130 km/h na autocestama uz nisku gustoću prometa ili pak brzinom do 50 km/h u gradu uz veliku gustoću prometa

- nemaju ograničeni izvor napajanja – za razliku od klasičnih pokretnih mreža, ad-hoc mreže vozila nemaju problema s kapacitetom i potrošnjom baterija
- imaju visoke računalne performanse – zbog toga što nemaju ograničenja u napajanju i prostoru, podržani su uređaji s puno jačim računalnim performansama nego kod klasičnih pokretnih mreža
- imaju poznat uzorak kretanja – za razliku od klasičnih pokretnih mreža, čvorovi u ad-hoc mrežama vozila slijede predefinjirani uzorak kretanja, tj. ceste i slijede predefinjirana prometna pravila kao npr. ograničenje brzine. Tako se može predvidjeti uzrok kretanja vozila do neke mjere
- poznata su svojstva čvorova – dužina, visina i širina.



Slika 2.3. Prikaz komunikacije u ad-hoc mrežama vozila¹

Jedan je od glavnih ciljeva ad-hoc mreža vozila pomaganje vozačima u vožnji kako bi se spriječile prometne nesreće. Postoje brojni primjeri kako komunikacija između vozila može izravno pomagati vozačima, a to su:

- pomoć na raskrižjima: kada se vozilo približava raskrižju, dobit će obavijest ukoliko se u poprečnoj ulici drugo vozilo kreće neprimjerenom brzinom zbog koje će možda proći

¹ Slika preuzeta s Internet stranice <http://adrianlatorre.com/projects/pfc/#/slide4>

kroz crveno svjetlo na semaforu ili znak STOP. Ovo pomaže u sprječavanju prometnih nesreća na T raskrižjima

- pomoć kod lijevog skretanja: kada vozilo na raskrižju skreće lijevo, dobit će obavijest ukoliko se neko vozilo brzo približava i nema dovoljno vremena za lijevo skretanje
- zabrana obilaženja: na cestama s dvije trake kada vozilo želi zaobići sporije vozilo i voziti u lijevoj traci, dobit će upozorenje da obilaženje nije sigurno ako se vozila iz suprotnog smjera ne pridržavaju prometnih pravila
- upozorenje o kočenju vozila ispred: vozilo će dobiti hitno upozorenje kada drugo vozilo, koje se nalazi nekoliko vozila ispred njega u istoj traci i koje je vjerojatno izvan vidnog polja, iznenada koči
- upozorenje o mogućem sudaru: vozilo će biti obavješteno ukoliko se kreće velikom brzinom koja može dovesti do udara u stražnji kraj vozila koje je ispred i koje se kreće sporije
- upozorenje o mrtvom kutu: na cestama s više traka vozila će biti upozorena kada je nesigurno promijeniti traku zbog vozila koja se nalaze u mrtvom kutu i koja je teško vidjeti.

2.5. Usluge i aplikacije u ad-hoc mrežama vozila

Ad-hoc mreže vozila imaju za cilj primijeniti najnoviju tehnologiju u vozilima i cestovnoj infrastrukturi kako bi podržali brojne usluge i aplikacije. Klasificiranjem usluga i aplikacija u ad-hoc mrežama vozila olakšava se njihov dizajn i razvoj te se mogu postaviti funkcijski ciljevi za svaku pojedinu kategoriju. U tablici 2.2 prikazana je podjela usluga i aplikacija prema njihovoj arhitekturi, modelu kritičnosti i tipu sustava [14]. U disertaciji se predloženi algoritam i model za učinkovito rasprostiranje poruka mogu koristiti u oba modela kritičnosti za usluge slanja sigurnosnih upozorenja, nadzora prometa i slanje obavijesti o prometnim uvjetima i nesrećama. Postoje tri glavna tipa sustava:

- kritični se sustav odnosi na klasu vremenskih najkritičnijih aplikacija i sadrži dva tipa usluga: (i) upravljanje hitnim slučajevima koje obuhvaća sustave koji nakon što se dogodi nesreća brzo pomažu u obavještavanju nadležnih hitnih službi i u pružanju hitne medicinske pomoći; (ii) sigurnosna upozorenja koja su sposobna otkriti nesigurne situacije i prenositi pravovremena upozorenja vozačima kako bi se spriječile prometne nesreće

Tablica 2.2. Podjela usluga i aplikacija u ad-hoc mrežama vozila

Arhitektura	Model kritičnosti	Tip sustava	Usluge	Aplikacije	
Inteligentna infrastruktura	Sigurnosno-kritični model	Kritični sustav	Upravljanje hitnim slučajevima	Sigurnosni i hitni sustavi	
			Sigurnosna upozorenja	Prevenција prometnih nesreća i sigurnosni sustavi	
	Nesigurnosno-kritični model	Sustav upravljanja prometom	Upravljanje infrastrukturom	Upravljanje grananjem Radovi na cesti i održavanje	
			Nadzor prometa	Nadzorni sustavi	
			Uvjeti prometa	Upravljanje cestovnim vremenskim uvjetima	
				Upravljanje nesrećama	
			Transport i održavanje komercijalnih vozila	Aktivnosti na komercijalnim vozilima	
				Kombinirani teret	
	Inteligentna vozila	Nesigurnosno-kritični model	Sustav za pomoć u vožnji	Pomoć na upravljačkoj ploči	Informacije vezane uz vozače
					Informacije o aktivnostima vozila u blizini
Informacije o utjecaju vozila					
Osnovne funkcionalnosti za pomoć vozaču					
Proaktivne funkcionalnost za pomoć vozaču					
Pomoć u stabilnosti vozila					
Upravljanje teretom					
Obavijest o prometnim nesrećama			Upozorenja među vozilima		

- sustav upravljanja prometom obuhvaća sve usluge koje su odgovorne za upravljanje transportnim sustavima na cesti kako bi se poboljšao protok prometa i kvaliteta putovanja. Uključuje sljedeće usluge: upravljanje infrastrukturom, nadzor prometa, slanje obavijesti o prometnim uvjetima te transport i održavanje komercijalnih vozila.

Upravljanje infrastrukturom učinkovito upravlja resursima cestovne infrastrukture kako bi kontrolirao protok prometa podešavanjem prometne infrastrukture, usmjeravanjem i raspoređivanjem sustava javnog prijevoza i prilagodljivim postavljanjem ograničenja brzine. Nadzor prometa u stvarnom vremenu prikuplja podatke o stanju na cestama i o prometu unutar određenog geografskog područja. Usluge uvjeta prometa vrednuju uvjete u kojima se pojavljuje cirkulacija prometa uzimajući u obzir različite aspekte, kao što su atmosferski uvjeti i prometni događaji. Transport i održavanje komercijalnih vozila nadgleda i prati posebna prijevozna sredstva kako bi certificirane stranke sigurno i učinkovito prevozile tereta

- sustav za pomoć u vožnji pomaže vozačima na različite načine kako bi vožnja bila ugodnija i manje stresna. Podržane su dvije glavne grupe usluga, tj. pomoć na upravljačkoj ploči i obavijest o prometnim nesrećama. Pomoć na upravljačkoj ploči ima za cilj pomoći vozaču tijekom vožnje i povećati njegovu prometnu svijest i odaziv. Tako prilikom detektiranja neizbježne prometne nesreće sustav može reagirati poduzimanjem potrebnih mjera kako bi se izbjegla prometna nesreća ili pripremi vozilo za nju (npr. hitno elektroničko aktiviranje kočnica, prikazivanje upozorenja prije sudara i obavještanje vozila koja se približavaju, aktiviranje zračnih jastuka, zatezanje sigurnosnih pojaseva itd.). Zanimljiv je primjer takve usluge autonomni sustav vozila (engl. *platooning*) u kojemu vozila na autocestama automatski slijede kolonu vozila na čelu koje je iskusni vozač. Na taj način vozilo ulazi u polu-autonomni način rada koji omogućava vozaču da tijekom vožnje obavlja druge poslove. Usluga obavijesti o sudarima kreirana je za otkrivanje i prenošenje informacija o nesrećama kako bi se obavijestile nadležne hitne službe i vozila koja se približava mjestu nesreće i tako izbjegle dodatne prometne nesreće.

3. ALGORITAM ZA UČINKOVITO RASPROSTIRANJE PORUKA U POKRETNIM MREŽAMA VOZILA ZASNOVAN NA NJIHOVOM TRENUTNOM POLOŽAJU

Zbog konstantnog i brzog pomicanja vozila, ad-hoc mreže vozila posjeduju vrlo dinamičnu mrežnu topologiju s puno prekida i dijeljenja mreže te je komunikacija u ad-hoc mrežama vozila izložena stalnim prekidima i kašnjenjima. Zbog toga učinkovito i brzo rasprostiranje poruka unutar gradskog područja s gustim prometom kao i rasprostiranje poruka preko većih geografskih područja prema vozilima koja nisu u dometu predstavlja velike izazove. Tijekom analize ad-hoc mreža vozila velikih razmjera u radu [2] je uočeno da postoji značajan broj vozila koja su daleko od gustih prometnih područja i koja nisu u kontaktu s drugim vozilima. Ta vozila čine sama svoju grupu i budući da nisu povezana s ostalim vozilima, ne mogu sudjelovati u rasprostiranju poruka. Mogu doći u kontakt s ostalim vozilima nakon nekog vremena, ali sve informacije koje su primili dok su bili nepovezani izgubljene su jer ne postoji spremnik poruka u vozilima. Zbog svojstva povremenog ili naizmjeničnog povezivanja u ad-hoc mrežama vozila, potrebni su komunikacijski mehanizmi koji mogu tolerirati kašnjenja i prekide. Dodavanjem SCF modela komunikacije povećava se širenje i pokrivenost informacija i sprječava se gubitak važnih informacija uzrokovan prekidima. Sljedeći zahtjevi moraju biti zadovoljeni u ad-hoc mrežama vozila kako bi širenje informacija bilo učinkovito:

- pokrivenost informacija i geografska skalabilnost: poruke treba širiti na što više vozila kroz velika geografska područja i područja male gustoće prometa
- pravovremenost: brzo rasprostiranje hitnih poruka poput informacija o nesrećama ili opasnostima u okolini od nekoliko kilometara
- smanjen mrežni promet: smanjen broj poslanih poruka i broj primljenih zalihosnih poruka
- inteligentno rasprostiranje: odabrati razašiljače za rasprostiranje poruka na temelju njihovih karakteristika i sposobnosti da uz što manje opće troškove (engl. *overheads*) dostave poruke što većem broju vozila
- minimalno i pametno korištenje infrastrukture: s obzirom da je infrastruktura skupa za implementaciju i održavanje, podložna kvarovima te je u vlasništvu trećih osoba (operatera) treba se koristiti što je manje moguće.

Prvi je izvorni znanstveni doprinos hibridni algoritam za učinkovito i inteligentno rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila koji kombinira V2V i SCF modele

komunikacije kako bi omogućio brzo i učinkovito rasprostiranje poruka u gustim dijelovima mreže, povećanje pokrivenosti mreže porukama i prenošenje poruka do nepovezanih dijelova mreže [8]. Algoritam na temelju geografskog položaja i okoline odabire najučinkovitije razasiljače poruka, a na temelju metode za određivanje gustoće prometa određuje granicu za promjenu komunikacijskog modela. Karakteristike komunikacijskih modela koji se koriste u predloženom algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka su sljedeće:

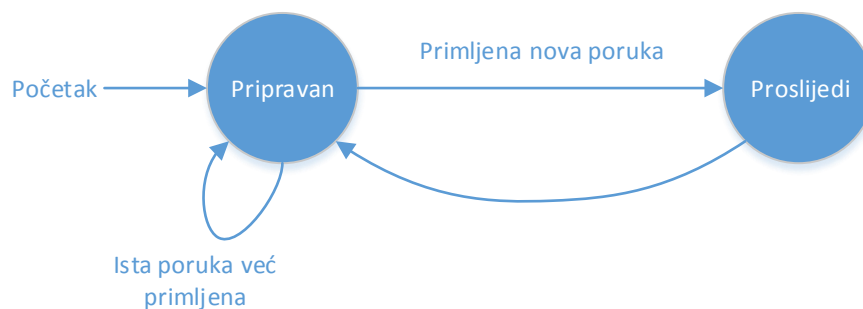
- V2V model komunikacije:
 - malo kašnjenje: omogućuje brzo rasprostiranje hitnih poruka u slučajevima poput prijave nesreća i poruka o iznenadnim događajima na cestama. Vozila koriste V2V komunikaciju za rasprostiranje poruka u njihovoj okolini do određenog broja skokova koji ovisi o povezanosti mreže i komunikacijskom dometu signala
 - nije potrebna infrastruktura: V2V model komunikacije odvija se u potpunom ad-hoc načinu rada bez potrebe za infrastrukturom što omogućava niske troškove implementacije ad-hoc mreža vozila
 - nemogućnost dostave poruka vozilima koja nisu povezana: ukoliko vozila nisu u komunikacijskom dometu, mogu primiti poruke samo ako su povezana s izvornim vozilom pomoću višestrukih skokova. U suprotnom vozila neće primiti poruke i neće biti obaviještena o nekom događaju.
- SCF model komunikacije:
 - povezivanje nepovezanih dijelova mreže: vozila spremaju primljene poruke u privremeni spremnik i drže ga ažurnog tako da uklanjaju stare informacije. Kada dođu u kontakt s drugim vozilima, uspoređuju spremnike i izmjenjuju poruke koje im nedostaju. Vozila koja su nisu povezana s mrežom vozila imaju mogućnost primiti poruke sa zakašnjenjem
 - nije potrebna infrastruktura: kao i kod V2V modela komunikacija se odvija u potpunom ad-hoc načinu rada
 - veliko kašnjenje: u usporedbi s V2V modelom komunikacije kašnjenja u dostavi poruka puno su veća jer ih vozila pronose duže vrijeme i razmjenjuju ih kada dođu u kontakt s drugim vozilima
 - potrebne su *beacon* poruke: da bi vozila znala vlastitu okolinu i susjede u komunikacijskom dometu, potrebno je u vremenskim intervalima slati *beacon* pozdravne poruke. Budući da je njihova veličina vrlo mala, one su najčešće zanemarivi trošak za mrežu.

3.1. Metode razaišljanja za rasprostiranje poruka

Razašljanje se koristi za dijeljenja poruka prema različitim odredištima u mreži. U ad-hoc mrežama vozila višestruki se skokovi često koriste za rasprostiranje informacija u mreži velikom brzinom po principu poplave što dovodi do velikog opterećenja mreže u smislu propusnosti mreže (engl. *bandwidth*). Najjednostavniji mehanizam za smanjivanje opterećenja mreže vjerojatnosno je rasprostiranje poruka (engl. *probabilistic flooding*) koje smanjuje opterećenje mreže, ali smanjuje i performanse, tj. brzinu širenja poruka u mreži. Vjerojatnosno rasprostiranje poruka moguće je provesti na dva načina. U prvom se koristi statična vrijednost vjerojatnosti, a u drugom dinamična vrijednost.

3.1.1. Klasično poplavljanje porukama

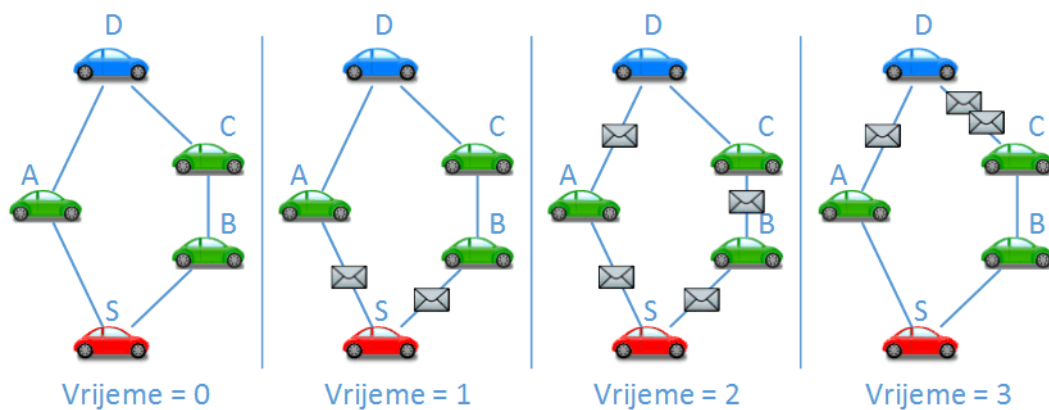
U klasičnom primjeru poplavljanja mreže porukama kada čvorovi (vozila i RSU) prvi put prime poruku, odmah ju ponovno razaišljaju, a ako su poruku već prije primili, ignoriraju ju kao što je prikazano na slici 3.1.



Slika 3.1. Princip jednostavnog poplavljanja mreže porukama

Prednost poplavljanja porukama je što svaki čvor treba imati samo mali spremnik u kojemu će držati listu poruka koje je primio i ponovno razaišljao. Osnovna shema poplavljanja porukama prikazana je na slici 3.2 [15]. Nakon što u vremenu 1 vozilo *S* razaišlja poruku, u vremenu 2 vozila *A* i *B* izvrše ponovno razaišljanje i vozilo *D* prima poruku, a vozilo *S* primi svoju poslanu poruku dva puta. U vremenu 3 vozilo *D* po drugi put prima istu poruku i izvršava ponovno razaišljanje te ju opet primaju vozila *A* i *C* što izaziva nepotrebnu zalihost. Ovakav način ponovnog razaišljanja poruka osigurava rasprostiranje informacija velikom brzinom koje će nakon nekog vremena eventualno stati. Kao posljedica toga dolazi do značajnog opterećenja mrežnog prometa zbog ponovnog razaišljanja velikog broja zalihosnih poruka. Ovo je opterećenje posebno izraženo u mrežama s velikom gustoćom [16] jer postoji

više čvorova u okolini koji izvršavaju ponovno razošiljanje iste poruke. Nadalje, u mreži se pošalje puno veći broj poruka od onoga koji je potreban da bi se osiguralo stopostotno širenje informacija. Ovo je uobičajen problem u bežičnim mrežama poznat pod nazivom oluja razošiljanja [17]. Prekomjerno ponovno razošiljanje poruka uzrokuje da se poruke natječu međusobno i s ostalim slanjima podataka što dovodi do zagušenja i kolizija te značajnog porasta kašnjenja i gubitka poruka u mreži. Nedostatak je i nepostojanje spremnika pa će poruke doći do nekog čvora samo ako postoji trenutna povezanost između tog čvora i pošiljatelja što znači da poplavljanje ne podržava komunikaciju između nepovezanih dijelova mreže. To je veliki problem pogotovo u gradskim područjima u situacijama s rijetkim prometom gdje je domet signala manji zbog različitih prepreka.

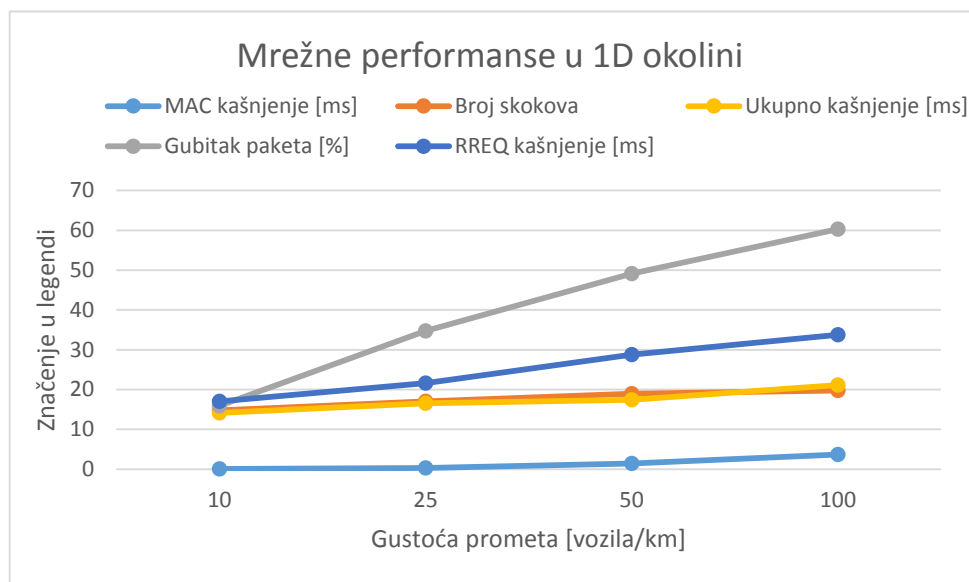


Slika 3.2. Klasično poplavljanje porukama u ad-hoc mreži vozila [15]

3.1.2. Problem oluje razošiljanja

Problem oluje razošiljanja [17] potječe iz mreža MANET u kojima protokoli usmjeravanja razošiljaju RREQ (engl. *Route REQuest*) poruke za pronalaženje optimalne rute do odredišta. Te su poruke obično vrlo male i cilj im je brže uspostavljanje željenih ruta ili kreiranje karte cijele mreže. U ad-hoc mrežama vozila koristi se isti princip i takve se poruke još nazivaju *beacon* poruke. Neke aplikacije u ad-hoc mrežama vozila koriste princip poplavljanja i u rasprostiranju podatkovnih poruka na određenom geografskom području što također dovodi do pojave oluje razošiljanja. U ad-hoc mrežama vozila razošiljanje se obično koristi za rasprostiranje prometnih informacija poput upozorenja o nesreći, zagušenju prometa, radovima na cesti, ruti obilaska i sl. u određenom području. Budući da takve informacije nisu vremenski kritične kao zahtjevi za rutom (RREQ), prometne poruke trebaju ostati u mreži dulje vrijeme. Ako postoji RSU, potrebno je poruku periodno ponovno razošiljati kako bi ju „održali na

životu“ dok je to potrebno. Stoga se oluja razošiljanja može pojaviti ako su gustoća prometa i frekvencija kojom RSU šalje poruke velike. Izravne su posljedice oluje razošiljanja u ovom slučaju nepotrebno trošenje vremena obrade, smanjivanje propusnosti u mreži i povećanje kašnjenja pristupa mediju (engl. *medium access delay*). U situacijama u kojima se u mreži ne nalaze poruke koje su vremenski kritične, kašnjenje poruka zbog oluje razošiljanja može biti zanemarujuće. Međutim, oluja razošiljanja ima veliki utjecaj prilikom slanja sigurnosnih i hitnih informacija jer uzrokuje prekide, kašnjenja i gubitak poruka. U [17] i [18] provedeno je istraživanje o ponašanju mreže u 1D (jednodimenzionalnoj) okolini pod utjecajem oluje razošiljanja u različitim gustoćama prometa od 10 vozila/km do 100 vozila/km na autocesti s četiri trake dugoj 10 km. Iz rezultata na slici 3.3 može se vidjeti da oluja razošiljanja loše utječe na mrežne performanse.



Slika 3.3. Utjecaj oluje razošiljanja na mrežne performanse u 1D okolini prema [19] i rezultatima iz [17] i [18]

Broj skokova potrebnih za propagiranje poruke razošiljanja do najudaljenijeg vozila u scenariju s rijetkim prometom iznosi 14, a u gustom prometu 19. Za aplikacije P2P (engl. *Peer-to-Peer*) poput prijenosa datoteka ili glasovne komunikacije duža ruta s većim brojem skokova vrlo je neučinkovita jer propusnost višestrukih skokova drastično opada s duljinom rute, tj. povećanjem broja skokova. To utječe i na pakete RREQ za otkrivanje rute kojima je potreban veći broj skokova od izvora do odredišta i nazad što se odražava na kašnjenje u otkrivanju rute (kašnjenje RREQ) koje u maloj gustoći prometa iznosi 17.05 ms, a u velikoj gustoći 33.76 ms, što je gotovo dvostruko dulje. Ukupno se kašnjenje povećava gotovo linearno i ukupno

povećanje iznosi gotovo 50% u gustom prometu u odnosu na rijetki promet. Najveći utjecaj oluja razošiljanja ima na gubitak paketa koji se drastično povećava s povećanjem gustoće prometa i iznosi preko 60% u gustoći prometa od 100 vozila/km. Uzrok tomu je da vozila koja prime razošiljanju poruku u istom vremenskom periodu, natjecat će se u njenom ponovnom razošiljanju i ući će u područje sudara ili kolizije.

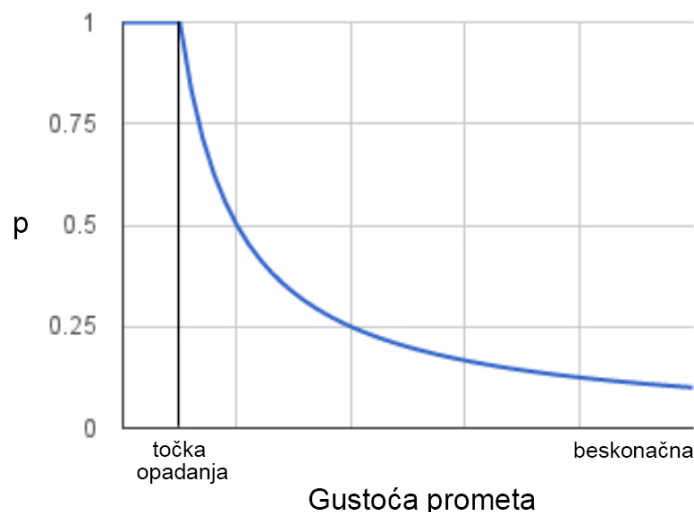
3.2. Tehnike sprječavanja oluje razošiljanja

Postoje različite tehnike i metode za suzbijanje oluje razošiljanja, no one mogu imati i negativni učinak na mrežu. Preveliko smanjivanje broja zalihosnih poruka može dovesti do smanjenja mrežne povezanosti te produžiti vrijeme potrebno za pronalaženje rute. Većina razvijenih protokola razošiljanja u ad-hoc mrežama vozila koristi različite načine za poboljšanje metode poplavljanja porukama kako bi ona bila što učinkovitija i kako se ne bi ponovno razošiljala svaka poruka koja je primljena. Uobičajeno rješenje koristi selektivno ponovno razošiljanje koje se temelji na različitim mjerilima vrednovanja poput pozicije vozila, smjera kretanja, gustoće prometa, brzine vozila itd. Selektivno ponovno razošiljanje može se vršiti dvama načinima: statičnom vjerojatnošću razošiljanja poruka i dinamičnom vjerojatnošću razošiljanja poruka [18].

3.2.1. Statična vjerojatnost razošiljanja poruka

Ako informacije o drugim vozilima iz mreže nisu dostupne, koristi se razošiljanje poruka sa statičnom vjerojatnošću razošiljanja poruke p . Na temelju vrijednosti vjerojatnosti p čvor odlučuje hoće li razošiljati poruku koja je primljena prvi put ili ne. Smanjivanje vjerojatnosti p znači da će manje čvorova razošiljati primljene poruke što dovodi do manjeg korištenja resursa mreže i manjeg broja zagušenja i kolizija. Korištenje premale vjerojatnosti p znači da pokrivenost poslanih poruka neće biti 100%. Stoga treba biti oprezan i pronaći pravi omjer (engl. *trade-off*) između povezanosti mreže i vjerojatnosti p (slika 3.4) [15]. Što je promet u mreži gušći, mreža je povezanija, tj. dovoljno je mala vrijednost vjerojatnosti p da bi se postigla potpuna povezanost mreže. Za dobivanje optimalne vrijednosti vjerojatnosti razošiljanja p u testnoj okolini ovog doprinosa i otkrivanje njenog utjecaja na kašnjenje u dostavljanju poruka, provedene su simulacije za različite vrijednosti vjerojatnosti p koje su odabrane tako da budu ravnomjerno raspoređene u rasponu od nula do jedan kao što slijedi:

$$p_i = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$$



Slika 3.4. Vjerojatnost razaslanja poruke u ovisnosti o gustoći prometa

Za potrebe ovog doprinosa razvijen je i implementirani algoritam 3.1 kojim se odlučuje hoće li se izvršiti razaslanje primljene poruke ili ne. ID-ovi svih poruka koje su primljene prvi puta pohranjuju se u privremeni spremnik da bi se moglo provjeriti je li pristigla poruka nova ili je već ranije primljena. Ako je pristigla nova poruka algoritam za razaslanje poruka sa statičnom vjerojatnošću odlučuje hoće li je razaslanjati na temelju vrijednosti vjerojatnosti razaslanja p_i .

Algoritam 3.1. Algoritam za razaslanje poruka sa statičnom vjerojatnošću

```

1: Ako sam primio Novu Poruku  $P_N$ 
2:   Pohrani  $P_N.ID$ 
3:   Ako je  $P_N.p_{rbr} < p_i // P_N.p_{rbr}$  - vjerojatnost razaslanja
4:     Rebroadcast  $P_N$ 
5:   Inače Ignoriraj

```

Simulacije su provedene korištenjem okoline i simulacijskih postavki kao što je prikazano u tablici 3.1. U svim su mjerenjima korištene su tri različite gustoće prometa da bi se vrednovala učinkovitost rasprostiranja poruka u situacijama s vrlo rijetkim, srednjim i gustim prometom. Budući da podaci o gustoći prometa na cestama za simulirano područje grada Leuvena nisu dostupni, prema procjeni na temelju veličine korištene karte i broja stanovnika na tom području, definirane su sljedeće gustoće prometa:

- niska LD (engl. *Low Density*) s gustoćom prometa od 50 vozila u mreži
- srednja MD (engl. *Medium Density*) s gustoćom prometa od 500 vozila u mreži
- visoka HD (engl. *High Density*) s gustoćom prometa od 1000 vozila u mreži.

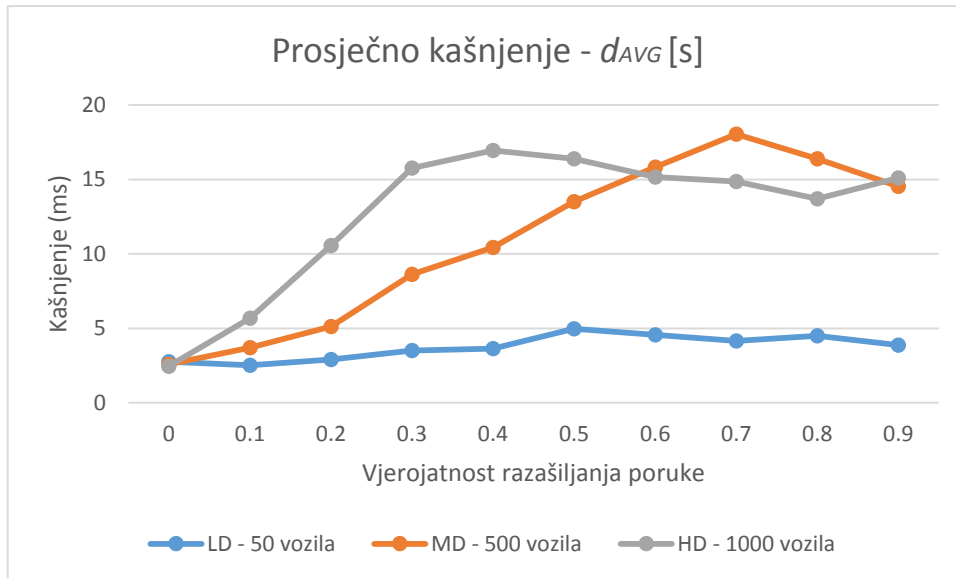
Tablica 3.1. Simulacijske postavke korištene u doktorskoj disertaciji

Simulacijsko okruženje	Veins 2.1. [20]
Mrežni simulator	Omnet++ 4.3.1. [21]
Simulator prometa	SUMO 0.17.1. [22]
Modul za modeliranje mobilnosti vozila	VACaMobil 2.1. [23]
Izvor karte	OpenStreetMaps [24]
Testna karta	Grad Leuven, Belgija
Scenarij	Gradsko i prigradsko područje
Dimenzije karte	6x7 km
Komunikacijski standardi	IEEE 802.11p IEEE 1609.4 DSRC/WAVE
Komunikacijski spektar	5.9 GHz (5.85-5.925 GHz)
Maksimalni komunikacijski domet	1000 m
Gustoća prometa	LD – 50 vozila na karti MD – 500 vozila na karti HD – 1000 vozila na karti
Interval <i>beacon</i> poruka:	0.1–5 s
- V2V komunikacijski model	1 s
- SCF komunikacijski model	2 s
Trajanje simulacije	300 s
Model kretanja vozila	Krauβ model [25]
Maksimalan brzina	70 m/s
Maksimalno ubrzanje	2.6 m/s ²
Maksimalno kočenje	4.5 m/s ²
Dužina vozila	5 m
Model ometanja signala zbog zgrada i prepreka	Simple Obstacle model [26]

Na slici 3.5 prikazan je utjecaj povećanja vjerojatnosti razasijanja p na prosječno kašnjenje dostave poruka u mreži. Prosječno kašnjenje dostave poruka u mreži računa se tako da se prvo izračuna zbroj kašnjenja pojedine poruke na svim čvorovima na kojima je primljena kao što je prikazano u izrazu (3-1) gdje je N_{rcv} ukupan broj čvorova koji su primili podatkovne poruke. Zatim se zbrajaju sva kašnjenja svih poruka u mreži koja u omjeru s ukupnim brojem svih čvorova koji su primili poruke čini prosječno kašnjenje dostave poruka kao što je prikazano u izrazu (3-2). N_{Umsg} je broj jedinstvenih poruka u mreži.

$$d_{MSG} = \sum_{i=1}^{N_{rcv}} d_i \quad (3-1)$$

$$d_{AVG} = \sum_{i=1}^{N_{Umsg}} \frac{\sum_{i=1}^{N_{Umsg}} d_{MSGi}}{\sum_{i=1}^{N_{Umsg}} N_{rcv_i}} \quad (3-2)$$

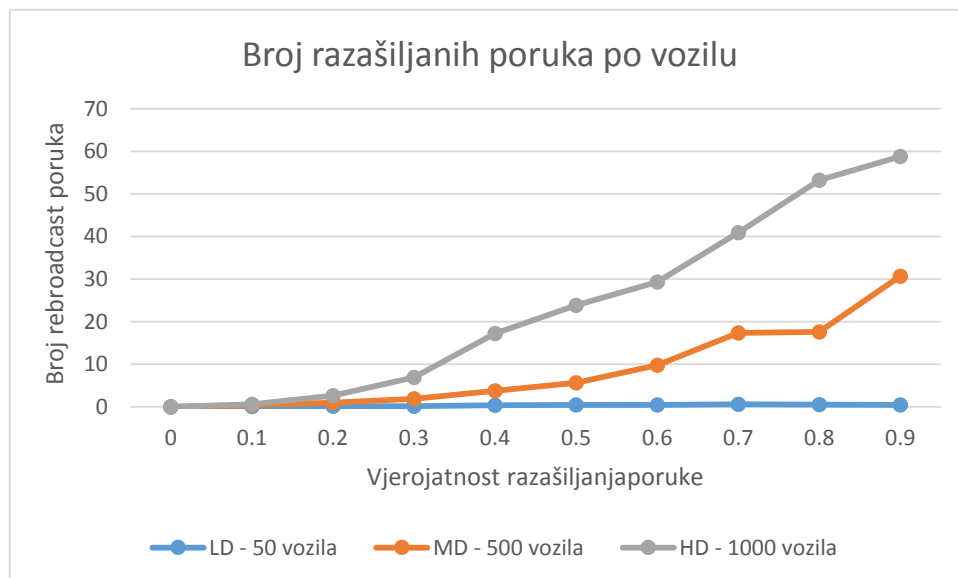


Slika 3.5. Prosječno kašnjenje po poruci za različite vrijednosti vjerojatnosti razaišljanja poruka

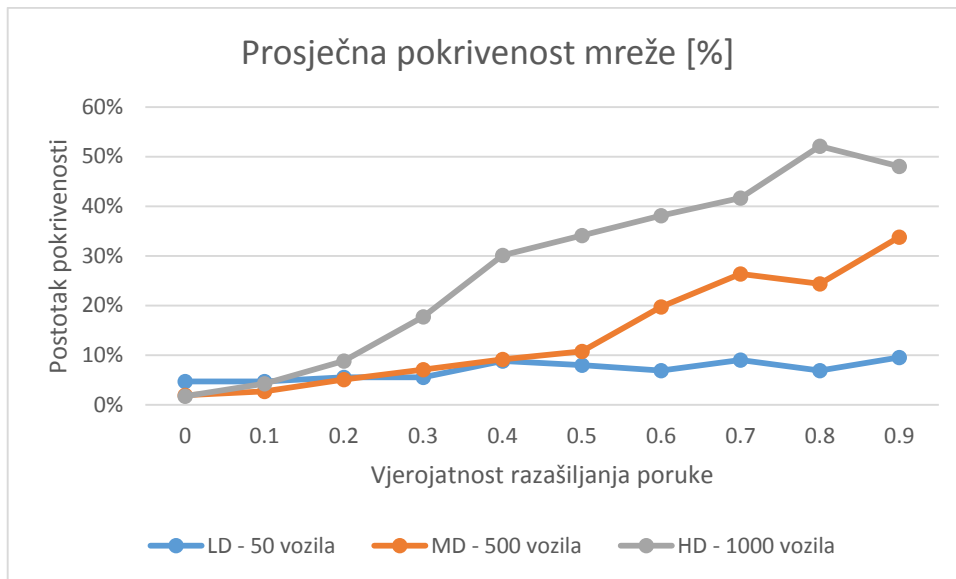
Za gustoću vozila LD s povećanjem vjerojatnosti razaišljanja dolazi do blažeg povećanja kašnjenja poruka u odnosu na gustoće vozila MD i HD. Razlog tomu je što se na velikom prostoru nalazi jako mali broj vozila, a povećanjem broja razaišljenih poruka ne dolazi do znatnog povećanja u ukupnoj količini razaišljanja kao što je prikazano na slici 3.6, niti u udaljenosti dostave poruka, tj. u većoj pokrivenosti mreže kao što je prikazano na slici 3.7. U ovakvoj maloj gustoći vozila na velikom prostoru dolazi do dijeljenja i nepovezanosti ad-hoc mreže vozila što znači da će poslane poruke biti rasprostranjene samo u vrlo malom krugu izdvojenog dijela ad-hoc mreže vozila i broj skokova će biti mali jer nema puno vozila koja su u komunikacijskom dometu i koja mogu razaišljati i širiti poruke na druge dijelove mreže. Prosječna pokrivenost mreže računa se prema izrazu (3-3) gdje je N_{nodes} ukupan broj čvorova u mreži.

$$C_{\%} = \frac{N_{rcv}}{N_{Umsg} \times N_{nodes}} \times 100\% \quad (3-3)$$

Kod gustoće vozila MD dolazi do gotovo linearnog povećanja kašnjenja do vrijednosti $p = 0.7$, a iza toga dolazi do smanjenja kašnjenja vjerojatno zbog značajnog povećanja broja 1-skok (engl. *1-hop*) susjeda. Za vrijednosti vjerojatnosti p od 0.7 do 0.8 to potvrđuju slike 3.6 i 3.7, a za vrijednost $p = 0.9$, iako dolazi do znatnog povećanja u broju razaslianih poruka i povećanju pokrivenosti mreže, prosječno se kašnjenje smanjuje. Jedino je objašnjenje ovakve pojave naglo povećanje u broju 1-skok susjeda koji primaju poruke i uspješno ih razasliaju. U gustoći vozila HD s povećanjem vjerojatnosti razaslijanja poruka dolazi do značajnog povećanja kašnjenja do vrijednosti $p = 0.3$, a zatim kašnjenje varira oko te vrijednosti. Uzrok tomu je što je u mreži velika gustoća prometa te malim povećanjem vjerojatnosti razaslijanja poruka s 0 na 0.1, 0.2 i 0.3 dolazi do naglog povećanja u broju vozila koja razasliaju poruke pa pokrivenost mreže naglo raste što znači da se povećava broj skokova koje poruke moraju napraviti. Nakon vrijednosti $p = 0.3$, iako broj razaslianih poruka i pokrivenost raste, kašnjenje ne prati taj trend, nego varira između vrijednosti 13.7 ms i 16.7 ms. To znači da je u ukupnom broju čvorova do kojih dolazi poruka najviše 1-skok čvorova. Kada se uspoređi HD gustoća vozila s gustoćama vozila LD i MD može se vidjeti da HD ima puno veću pokrivenost mreže, a posljedica toga je puno veći broj razaslianih poruka jer više primljenih poruka znači i veći broj razaslijanja. Kašnjenje nakon $p = 0.6$ manje je u odnosu na MD što potvrđuje da je u tim situacijama značajno povećam broj 1-skok čvorova.



Slika 3.6. Ukupan broj razaslianih poruka po vozilu za različite vrijednosti vjerojatnosti razaslijanja poruke



Slika 3.7. Prosječna pokrivenost mreže za različite vrijednosti vjerojatnosti razasiljanja poruka

Ovakav način razasiljanja poruka jednostavan je za implementaciju te se smanjivanjem vjerojatnosti za razasiljanje poruka poboljšavaju performanse u odnosu na stopostotno razasiljanje. Ovaj pristup ne uzima u obzir nikakve informacije i na temelju slučajne vrijednosti vjerojatnosti odlučuje hoće li poruku razasiljati ili odbaciti. Budući da ne postoji kontrola nad odlučivanjem o razasiljanju poruka na temelju različitih parametara, u nekim će se slučajevima odbaciti važne poruke ili poruke koje imaju potencijal dalekog rasprostiranja. Stoga je za učinkovitije rasprostiranje poruka potrebno koristiti dinamično razasiljanje poruka koje uključuje različite parametre na temelju kojih se donose informirane odluke o razasiljanju primljenih poruka.

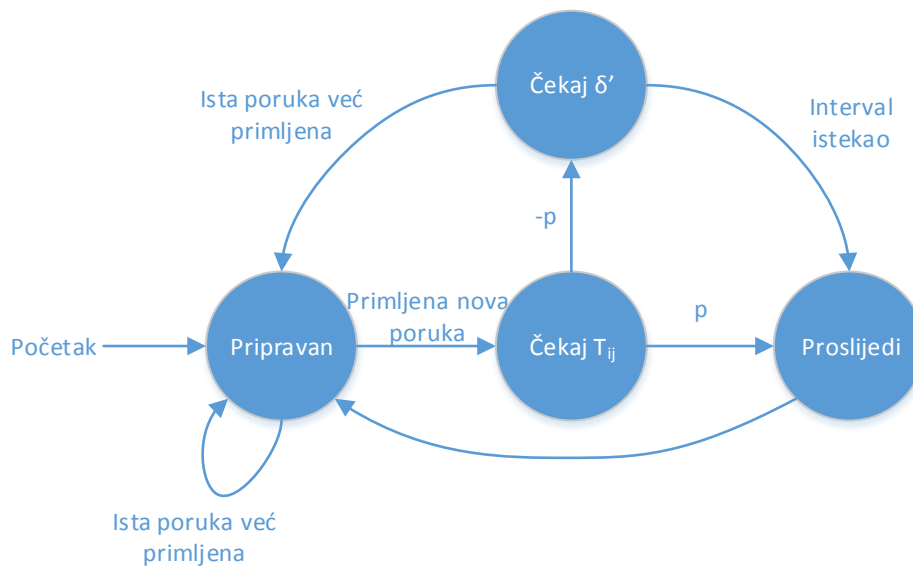
3.2.2. Dinamično razasiljanje poruka

Jednostavniji primjeri dinamičnog razasiljanja poruka ne zahtijevaju razmjenu znanja sa susjedima (osim GPS pozicije susjeda) ili održavanje mrežne topologije. Temelje se na jednostavnom određivanju udaljenosti trenutnog čvora i od pošiljatelja poruke j [19]. Ta se udaljenost može izraziti kao $0 \leq q_{ij} \leq 1$ i postoji nekoliko načina kojima se može odrediti. Moguće je izračunati relativnu udaljenost D_{ij} između čvorova i i j korištenjem GPS podataka o poziciji pošiljatelja ili na temelju mjerenja jačine primljenog signala PS kao što je prikazano u izrazima (3-4) i (3-5) gdje R predstavlja polumjer dometa signala (engl. *transmission range*), PS_{max} maksimalnu vrijednost jačine primljenog signala i PS_{min} minimalnu vrijednost jačine primljenog signala:

$$q_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{ako je } D_{ij} < 0 \\ \frac{D_{ij}}{R} & \text{ako je } 0 \leq D_{ij} \leq R \\ 1 & \text{ostali slučajevi} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$q = \begin{cases} 0, & \text{ako je } PS_x < PS_{min} \\ \frac{PS_{max} - PS_x}{PS_{max} - PS_{min}}, & \text{ako je } PS_{min} \leq PS_x < PS_{max} \\ 1, & \text{ostali slučajevi} \end{cases} \quad (3-5)$$

Na temelju određivanja udaljenosti između čvorova ili jačine primljenog signala na slici 3.8 prikazano je načelo dinamičnog razošiljanja poruke. Kada čvor primi paket prvi put, čekat će kratki vremenski interval T_{ij} . Nakon što taj interval istekne, pokrenut će se razošiljanje paketa s određenom vjerojatnošću p . U slučaju kada se paket ne razošilja, čvor će čekati još dodatni vremenski interval δ' koji je odabran tako da vrijedi $\forall T_{ij}: \delta' > T_{ij}$ kako bi provjerio je li poruku razošiljao neki drugi čvor i da ne bi došlo do izumiranja poruke (engl. *die-out*).



Slika 3.8. Načelo dinamičnog razošiljanja poruke za sprječavanje oluje razošiljanja na temelju određivanja udaljenosti između čvorova ili jačine primljenog signala

U [17] i [18] postavljen je temelj za rješavanje problema oluje razošiljanja u ad-hoc mrežama vozila. Do tada se većina istraživanja koncentrirala na MANET. Autori su razvili tri različite dinamične metode za rješavanje problema oluje razošiljanja u ad-hoc mrežama vozila:

1. *Weighted p-persistence* razošiljanje – prema pravilu ove metode nakon primitka poruke s čvora i , čvor j provjerava njen ID i razošilja ju s vjerojatnošću p_{ij} ako je primio poruku

prvi put, u suprotnom ju odbacuje. Vjerojatnost p_{ij} se može izračunati kao omjer relativne udaljenosti između čvorova i i j i prosječnog dometa signala kao što je prikazano u izrazu (3-6). To znači da ova metoda daje veću vjerojatnost za razošiljanje poruke čvorovima koji su više udaljeni od pošiljatelja.

$$p_{ij} = \min\{q_{ij}\} = \frac{D_{ij}}{R} \quad (3-6)$$

Vremenski odsječak T_{ij} je predefiniran i ako unutar njega čvor j primi istu poruku iz više izvora, odabire najmanju vrijednost vjerojatnosti p_{ij} . Ako pak čvor j odluči da neće razošiljati poruku, prvo ju pohrani u spremnik u vremenskom intervalu od δ' , a ako ju nitko od 1-skok susjeda nije razošiljao, razošiljati će ju s vjerojatnošću 1.

2. *Slotted 1-persistence* – prema pravilu ove metode nakon primitka poruke čvor provjerava njen ID i razošilja ju s vjerojatnošću 1 u danom vremenskom odsječku T_{Sij} ako primi paket prvi puta i ako nije primio duplikate prije dodijeljenog vremenskog odsječka. U suprotnom, odbacuje paket. T_{Sij} može biti izračunat na temelju relativne udaljenosti D_{ij} između čvorova i i j , dometa signala R i preodređenog broja odsječaka N_S (3-7):

$$T_{Sij} = S_{ij} \times \tau \quad (3-7)$$

gdje τ predstavlja 1-skok kašnjenje koje uključuje kašnjenje pristupa mediju i kašnjenje propagacije poruke. S_{ij} je dodijeljeni broj odsječka koji se može izračunati pomoću (3-8):

$$S_{ij} = \begin{cases} \left\lceil N_S \left(1 - \frac{D_{ij}}{R}\right) \right\rceil, & D_{ij} \leq R \\ 0, & D_{ij} > R \end{cases} \quad (3-8)$$

Vremenski odsječak slijedi istu logiku kao i *weighted p-persistence* razošiljanje, ali umjesto izračunavanja vjerojatnosti razošiljanja svaki čvor koristi GPS informacije kako bi izračunao vrijeme do ponovnog slanja.

3. *Slotted p-persistence* – prema pravilu ove metode nakon primitka poruke čvor provjerava njen ID i razošilja ju s predodređenom vjerojatnošću p u određenom vremenskom odsječku T_{Sij} , kao što je prikazano u izrazu (3-7), ako je paket primljen

prvi put i nije primljen više puta prije dodijeljenog vremenskog odsječka. U suprotnom odbacuje paket. Svaki čvor treba pohraniti poruku određeni period vremena $[N_s - 1] \times T_{ij} + \delta'$ i razasijati ju s vjerojatnošću 1 ako ju nitko od susjeda nije razasijao kako bi se spriječilo izumiranje poruke.

Eksperimentalno je dokazano u [17] i [18] da se s predloženom *slotted p-persistence* metodom u 1D scenariju (autoceste) može smanjiti zalihost i gubitak paketa za 90% pri čemu zadržava prihvatljivo kašnjenje s kraja na kraj (engl. *end-to-end*) za većinu aplikacija. U prvom i drugom doprinosu u disertaciji korišteno je dinamično razasijanje poruka jer osigurava puno bolje performanse od korištenja statične vjerojatnosti razasijanja poruka te omogućuje kontrolu nad razasijanjem poruka uvođenjem raznih parametara u proces odlučivanja o razasijanju poruka. Predloženi algoritam i model učinkovitog rasprostiranja poruka koriste poboljšane verzije *weighted p-persistence* i *slotted p-persistence* modela razasijanja.

3.2.3. Pristupi u rješavanju problema oluje razasijanja prema njihovom usmjerenju

Općenito se algoritmi i protokoli koji se bave sprječavanjem oluje razasijanja dijele u dvije grupe prema njihovom usmjerenju: (i) usmjereni prema primatelju (engl. *receiver oriented*) u kojoj čvorovi koji primaju poruke odlučuju o razasijanju te poruke i (ii) usmjereni prema pošiljatelju (engl. *sender oriented*) u kojem se odluka o daljnjem razasijanju poruke prenosi zajedno s podatkovnom porukom što znači da pošiljatelj odlučuje o njenom razasijanju [27].

Postojeći pristupi usmjereni prema primatelju temelje se na lokalnim vremenskim brojačima koji određuju vrijeme razasijanja na svakom čvoru zasebno. Svaki čvor pokreće vremenski brojač nakon što primi razasijanu poruku i može ju ponovno razasijati nakon što vremenski brojač istekne. Trajanje „vremena čekanja“ podešava se prema lokalnoj bazi znanja poput broja susjeda koji nisu primili poruku do sada, statusa povezanog skupa čvorova ili udaljenosti od izvorišnog čvora. Iako odgođeno slanje poruke rješava oluju razasijanja, kašnjenje nakon svakog skoka usporava rasprostiranje poruke i povećava vremenske rokove dostave. Stoga ovaj pristup ima ograničeno korištenje u vremenski kritičnim aplikacijama. Najznačajniji pristupi usmjereni prema primatelju opisani su u nastavku.

U [28] autori su predstavili protokol SBSM (engl. *Seamless Broadcasting from Static to Mobile*) koji ne zahtijeva da čvorovi vode evidenciju i izmjenjuju podatke o poziciji, kretanju i ostalim prometnim informacijama, a daje bolje performanse od postojećih protokola temeljenih na pragovima i prometnim informacijama. Za razliku od ostalih metoda u ovoj metodi dva čvora

ne izmjenjuju poruke svaki put kada otkriju da su novi susjedi jer je cilj protokola zadržati stopu uspjeha, a pri tome značajno smanjiti ukupan broj poslanih poruka (engl. *flooding rate*). Protokol je lokaliziran, temeljen na CDS-u (engl. *Connected Dominating Set*) i na principu eliminacije susjeda na temelju trenutno dostupnih informacija o susjedima. Protokol periodno šalje *beacon* poruke kako bi ažurirao lokaciju bazu podataka. Svaki čvor ima dvije liste: *N* listu susjeda koji nisu primili poruku do sada i *R* listu susjeda koji su primili poruku. U početku su svi susjedi u *N* listi. Kada čvor primi poruku, dodaje ga u *R* listu i makne ga iz *N* liste. Postavlja se vrijeme čekanja prije mogućeg slanja nove poruke koje je obrnuto proporcionalno broju neinformiranih čvorova koji nisu primili poruku, a čvorovi koji su u CDS-u imaju kraće vrijeme od onih koji nisu. CDS kao dominantna povezana grupa predstavlja kralježnicu mreže i ponovno se izračunava nakon svake *beacon* poruke. Princip računanja je da član CDS-a mora imati barem dva susjedna čvora koja nisu međusobno susjedi [29]. U [30] autori su nadogradili SBSM i razvili protokol ABSM koji dodaje informaciju o primljenoj razaslanjanoj poruci u *beacon* poruku kao potvrdu primitka. Ako susjedi ne potvrde primitak, vraćaju se opet u listu *N* i na ovaj način protokol detektira greške u razaslanjanju poruka i ponovno razaslanja poruku. Nedostatak je što ne uzima u obzir udaljenost do pošiljatelja koja može dodatno optimizirati razaslanjanje poruka te ponekad čvorovi koji nisu dio CDS-a prosljede poruku prije onih koji jesu. U prvom doprinosu osnova algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka trenutni je položaj vozila i udaljenost od pošiljatelja jer se korištenjem tih informacija mogu učinkovitije rasprostirati poruke kroz mrežu.

Protokol ReC (engl. *REceiver Consensus*) [27] ukazuje na nedostatke u rasprostiranju poruka upozorenja koji nastaju zbog oluje razaslanjanja čiji je uzročnik prekomjerno razaslanjanje poruka. Protokol ReC se temelji na pristupu usmjerenom prema primatelju jer u 2D scenarijima (urbanim područjima) odabir najudaljenijeg čvora može dovesti do problema skoka na raskrižju (engl. *jump over intersection*), kao što je prikazano na slici 3.9 b). Vozilo *A* koje je pošiljatelj poruke odabrat će vozilo *C* za daljnje razaslanjanje poruke. Problem je što vozilo *A* nije svjesno vozila *D* kojeg vidi vozilo *B* tako da poruke neće doći do vozila *D*. U predloženim je doprinosima ovaj problem riješen tako što se rasprostiranje poruka vrši u četiri različita smjera. U pristupu usmjerenom prema primatelju vozilo *B* može prepoznati potrebu da razaslanja poruku koja će stići do vozila *D*. ReC se sastoji od dviju komponenti: rangiranja na temelju lokacije (engl. *location-based ranking*) i eliminacije susjeda na temelju potvrde (engl. *acknowledgment-based neighbour elimination*). Na temelju lokalnog znanja rangiraju se potencijalni razaslanjači korištenjem njihove geografske lokacije. Svi čvorovi koji potencijalno mogu primiti poruku rangiraju se na temelju njihove udaljenosti od idealne pozicije za razaslanjanje (slika 3.9) koja je

smještena u centroidu ostalih čvorova za koje se vjeruje da trebaju primiti tu poruku. U predloženom se algoritmu i modelu za učinkovito rasprostiranje poruka također koristi pristup rangiranja susjeda, ali se za rangiranje koriste parametri poput udaljenosti i broja 1-skok i 2-skok susjeda. U okolinama s različitim dometom prijenosa rangiranje susjeda vrši se na temelju $d-r$ principa gdje je d udaljenost do idealne pozicije, a r komunikacijski domet čvora. Najbolji razasilač razasila poruku trenutno nakon što ju primi, a ostali služe kao podrška ako on ne uspije. Pomoću *beacon* poruka izmjenjuju se podaci o lokalnoj topologiji, geografskoj lokaciji i CDS-u. U *beacon* porukama se šalju i potvrde o primitku poruke upozorenja. Eliminacija susjeda na temelju potvrde odvija se prema sljedećem principu. Za svaku poslanu poruku upozorenja svaki čvor dijeli svoje susjede u tri skupa prema njihovom statusu primanja: R – čvorovi koji su pomoću *beacon* poruke poslali potvrdu da su primili poruku, P – čvorovi koji su potencijalno primili poruku (još uvijek nisu potvrdili, ali su u komunikacijskom dometu) i N – čvorovi koji nisu primili poruku. Onaj čvor koji više nije susjed miče se iz sva tri skupa. Kada se N skup isprazni, slanje poruke se trenutno prekida, a kada se N skup počne puniti, slanje poruke se ponovno pokreće.

Slika 3. dostupna u [27]



Slika 3.9. Primjer rada protokola ReC u 2D okolini [27]

Određivanje centroida čvorova koji trebaju primiti poruku najbitnija je funkcija u odabiru idealnog razasilača u radu [27] i stoga pogreška u njenom određivanju može dovesti do velikog kašnjenja i smanjenja pouzdanosti dostave poruka. Budući da je ad-hoc mreža vozila vrlo dinamična, posebno u 2D scenarijima u naseljenim područjima s preprekama koje ograničavaju vidljivost i domet signala, određivanje centroida je vrlo zahtjevno i njegova se pozicija brzo mijenja pa se mogu pojaviti greške. U predloženom se algoritmu i modelu za učinkovito rasprostiranje poruka odabiru najučinkovitiji razasilači u četiri smjera i greška koja se može

pojaviti prilikom njihovog odabira zbog dinamične ad-hoc mreže vozila ne utječe znatno na performanse kao kod odabira centroida jer će se poruke rasprostirati u četiri različita smjera.

Pristupi usmjereni prema pošiljatelju imaju trenutno razošiljanje poruke jer pošiljatelj odabere jedan ili više čvorova koji će poruku razošiljati. Odluku šalje s podacima, a čvorovi koji prime podatke i pozitivnu odluku, odmah razošiljaju poruke. Ovaj pristup je obećavajući za primjenu u vremenski kritičnim aplikacijama. Negativna je strana ovog pristupa niska stopa prijema poruka. Odabrani najbolji čvor za razošiljanje poruke ponekad ne primi zahtjev za razošiljanjem jer najudaljeniji čvorovi imaju najveći gubitak primanja poruka ili možda više nisu susjedi s pošiljateljem. To je posebno izraženo u 2D scenarijima u kojima dolazi do čestog prekida ad-hoc mreže vozila zbog prepreka u okolini.

Metoda OppCast usmjerena prema pošiljatelju opisana je u [31]. Da bi se povećao napredak u skokovima, svaki potencijalni razošiljač izračunava kašnjenje ponovnog razošiljanja koje je obrnuto proporcionalno s udaljenošću od prethodnog razošiljača. Onaj koji ima najveći napredak u skokovima postat će novi razošiljač i prosljedit će poruku. Da bi se poruke razošiljale pouzdano i učinkovito i da bi se potisnuli ostali kandidati za razošiljače, koriste se *beacon* poruke prije svakog slanja i razošiljanja. *Beacon* poruke se šalju na redovnoj bazi, imaju veliki domet i pomoću njih se obavještavaju ostali čvorovi o razošiljanju te se tako izbjegava slanje zalihosnih poruka. Slanje *beacon* poruka vrši se velikom frekvencijom (svake 0.1 s) i iako su male veličine, mogu dovesti do nepotrebnih zagušenja mreže što je dokazano u poglavlju 3.3.1. Jedan od glavnih ciljeva metode OppCast je smanjivanje ukupnog broja razošiljanja poruka pa je metoda proširena s dvjema funkcionalnostima. Prva odabire pomoćni čvor koji je najbliži sredini između pošiljatelja i razošiljača koji će također razošiljati poruke da bi se povećala pouzdanost dostave poruka u slučaju da ju neki susjedi nisu primili. Druga koristi SCF model komunikacije za okoline s rijetkim prometom i omogućuje prenošenje poruka do nepovezanih čvorova. U predloženom algoritmu i modelu za učinkovito rasprostiranje poruka korišten je princip razošiljanja i prosljeđivanja poruka kao što je opisano u metodi OppCast, ali metoda OppCast predviđena je samo za 1D scenarije. Predloženi algoritam i model za učinkovito rasprostiranje poruka će dokazati učinkovitost rasprostiranja poruka po principu OppCast u 2D scenarijima.

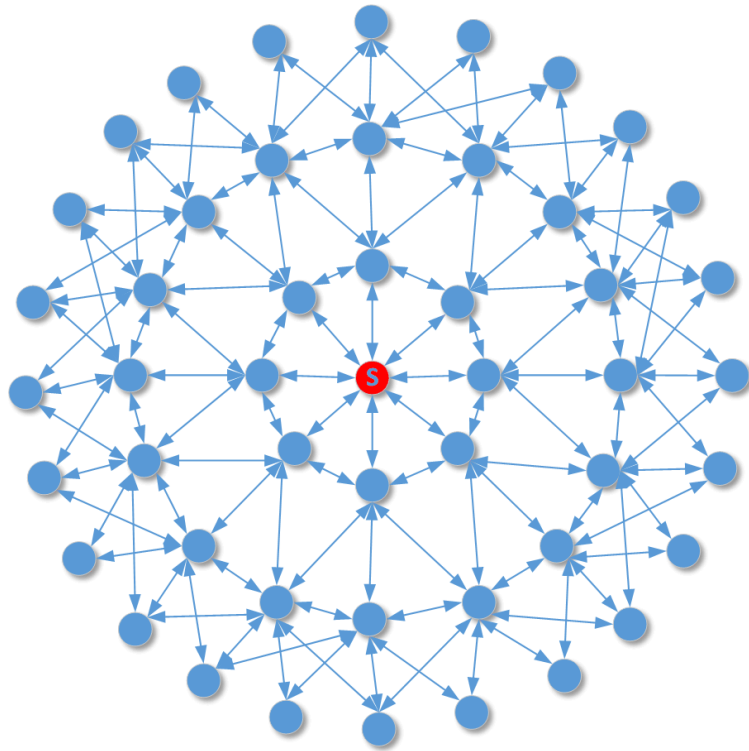
U [32] prikazan je distribuirani protokol razošiljanja višestrukih skokova za sigurnost vozila u 1D okolini. Algoritam se temelji na predodabiru najdaljeg prijenosnog čvora s najvećim rasponom (engl. *farthest spannign relay*) za razošiljanje poruke umjesto samo na odabiru najudaljenijeg čvora (engl. *farthest relay*). Najudaljeniji je prijenosni čvor s najvećim rasponom čvor koji ima najveći $D + R$ zbroj gdje je D udaljenost od izvornog čvora do

razašiljača, a R polumjer dometa razašiljača. Svako vozilo šalje polumjer prijenosa u *beacon* porukama. Može se pojaviti problem da su *beacon* poruke prevelike što će dovesti do većih grešaka u slanju i veće zagušenosti mreže. Autori nisu vodili računa ni o usmjerenju razašiljača te je upitna je funkcionalnost protokola u 2D okolinama.

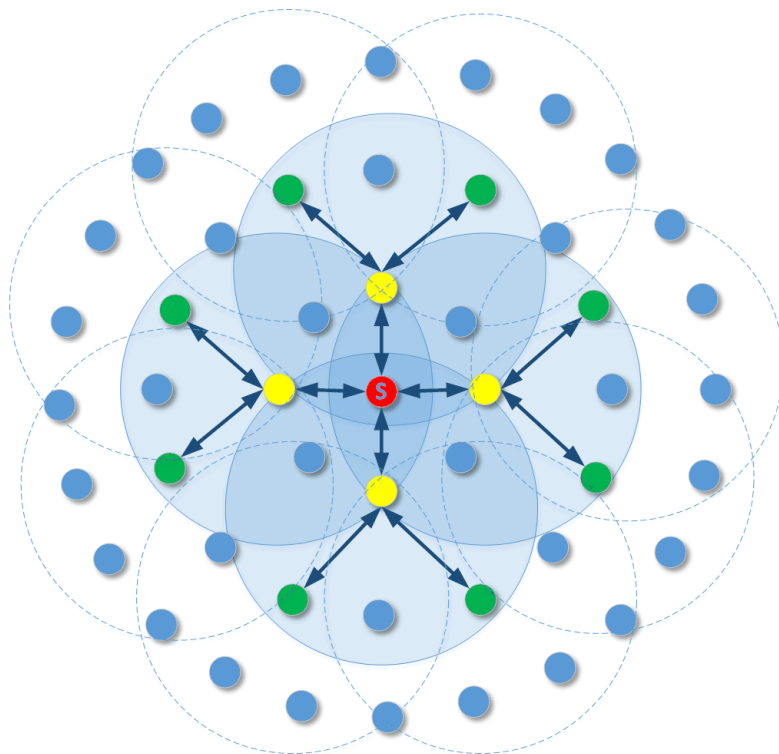
U oba pristupa usmjeravanja najudaljeniji susjedni čvor razašilja poruku da bi se ubrzalo njeno rasprostiranje kroz mrežu. Iako je prisutan veliki postotak gubitka paketa u ad-hoc mreži vozila, da bi se osiguralo da su sva vozila između dvaju uzastopnih razašiljanja primila poruku, nisu potrebna dodatna razašiljanja poruka jer je prilikom razašiljanja prisutna zalihost. U doprinosima u disertaciji korištena je kombinacija obaju pristupa usmjeravanja razašiljanja prema njihovom usmjerenju. Usmjerenje prema pošiljatelju se koristi kao osnovni način rasprostiranja poruka, a usmjerenje prema primatelju kao pomoćna metoda za rasprostiranje poruka. Česti prekidi u ad-hoc mreži vozila zahtijevaju dodatne mehanizme za ponovno pokretanje rasprostiranja poruka nakon otkrivanja novih susjeda. U predloženom algoritmu i modelu za učinkovito rasprostiranje poruka nakon otkrivanja novih susjeda koristi se SCF model komunikacije za sinkronizaciju sadržaja spremnika poruka.

3.2.4. Smanjivanje broja razašiljenih poruka

Primjenom ranije navedenih metoda za rješavanje oluje razašiljanja, razašiljanje poruka se može drastično smanjiti. Kao što je prikazano na slici 3.10 kada bez kontrole čvor S šalje poruku i kada svi čvorovi sudjeluju u komunikaciji, potrebno je 24 puta razašiljati poruku da bi ona stigla do 3-skok susjeda što dovodi do velikog broja primljenih zalihosnih poruka. Ukupan broj primljenih poruka je 154, a u mreži se nalazi samo 49 čvorova što znači da je prosječno svaki čvor primio istu poruku više od tri puta. Ovakav način razašiljanja poruka opterećuje mrežu što dovodi do smanjene propusnosti zbog nepotrebnog prometa, a uslijed toga do gubitka poruka. Pametnim odabirom čvorova koji će razašiljati poruke može se značajno smanjiti broj nepotrebnih razašiljanja i ukupan broj poruka u mreži te na taj način rasteretiti mrežu i osigurati veliku propusnost za druge hitnije poruke ili poruke višeg prioriteta. Na slici 3.11 prikazano je da ukoliko se pametno odaberu razašiljači, potrebno je samo 12 puta razašiljati poruku što je dva puta manje od gornjeg primjera. Također, ukupan broj primljenih poruka u mreži je 78 što je također dva puta manje od gornjeg primjera. Stoga se u prvom doprinosu u prvom koraku metode usmjerene prema pošiljatelju koristi pametni odabir razašiljača da bi se smanjio broj nepotrebnih razašiljanja i da bi opterećenje mreže bilo što manje.



Slika 3.10. Klasično poplavljanje porukama u kojem sudjeluju svi čvorovi



Slika 3.11. Razašiljanje poruka pametnim odabirom razašiljača

3.3. Opis korištenja V2V modela komunikacije u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka

U algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila za V2V model komunikacije koriste se dvije metode za učinkovito i inteligentno rasprostiranje poruka koje su razvijene za potrebe ovog doprinosa. Prva metoda se temelji na pristupu usmjerenom prema pošiljatelju u kojoj pošiljatelj odabire razašiljače iz skupa svojih susjeda na temelju udaljenosti od njega te broja 1-skok susjeda potencijalnih razašiljača. U drugoj BackUp metodi koristi se pristup usmjeren prema primatelju u kojoj primatelji koji se nalaze na „dobroj“ poziciji mogu sami odlučiti hoće li proslijediti poruku ili ne.

U predloženom su algoritmu svi čvorovi svjesni svoje 1-skok okoline, tj. znaju koji su im čvorovi dostupni za izravnu komunikaciju i imaju informacije o vremenu kada su sreli 1-skok susjeda, njegovoj udaljenosti, GPS poziciji i ukupnom broju njegovih 1-skok susjeda. Na temelju tih informacija svaki čvor određuje na kojoj mu strani se nalazi susjed te izračunava vrijednost njegovog ranga. Struktura prema kojoj se pohranjuju informacije o 1-skok susjedima prikazana je u tablici 3.2. Struktura je definirana prema potrebama algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka i sadrži sve potrebne informacije koje se koriste u razvijenim metodama.

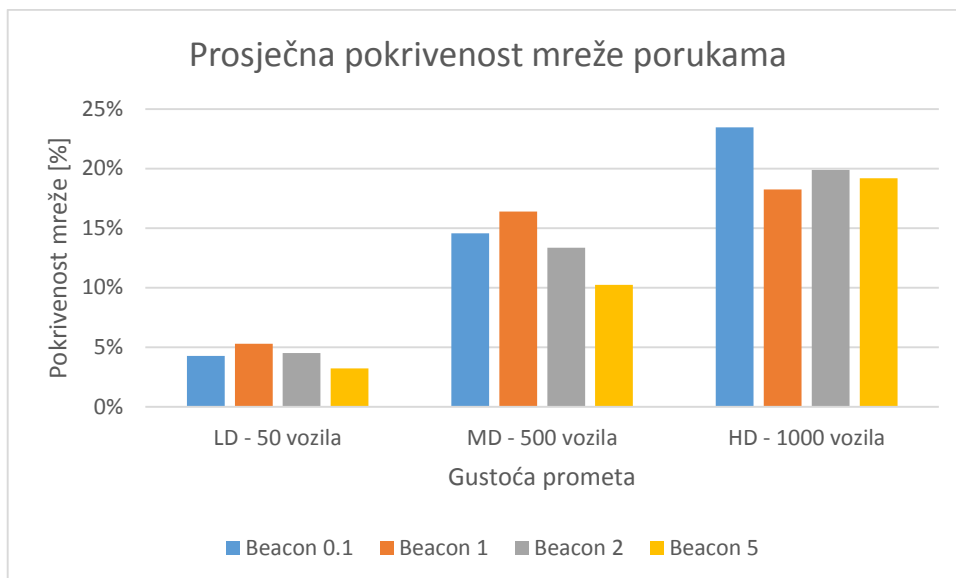
Tablica 3.2. Struktura za pohranjivanje informacija o 1-skok susjedima

Varijabla	Tip varijable	Opis
<code>neighborID</code>	<code>Int</code>	Jedinstveni identifikacijski broj za svaki čvor u mreži
<code>neighborArrivalTime</code>	<code>simtime_t</code>	Vrijeme kada je susjed opažen
<code>neighbourDistance</code>	<code>Double</code>	Euklidska udaljenost do susjeda
<code>neighbourPosition</code>	<code>Coord</code>	GPS koordinate susjeda
<code>neighbours1HopNeighboursNum</code>	<code>Int</code>	Ukupni broj 1-skok susjeda trenutnog susjeda
<code>neighbourRanking</code>	<code>double</code>	Vrijednost ranga trenutnog susjeda
<code>neighbourSide</code>	<code>Int</code>	Relativna strana na kojoj se trenutni susjed nalazi

3.3.1. Odabir *beacon* intervala za V2V model komunikacije u algoritmu

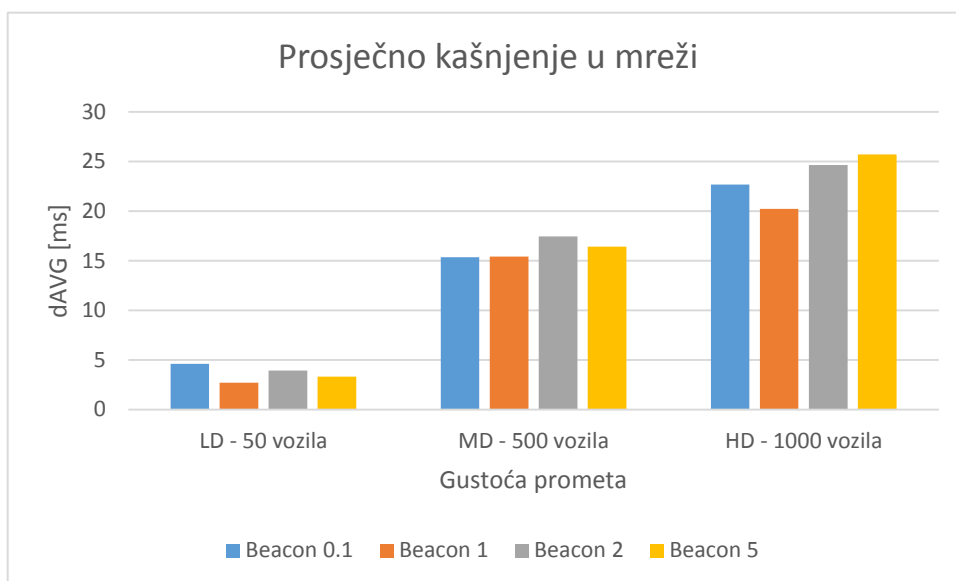
U dobivanju informacija o 1-skok susjedima ključne su *beacon* poruke. Općenito u većini algoritama i protokola za ad-hoc mreže vozila svaki čvor periodno šalje kratke statusne poruke s osnovnim informacijama o vozilu da bi se kreirala distribuirana svijest. *Beacon* poruke su smatrane malim troškom u smislu trošenja resursa mreže jer su obično puno manje od klasičnih podatkovnih poruka. Ovisno o scenariju, *beacon* poruke se mogu distribuirati kroz 1-skok ili višestruki-skok princip. U ad-hoc mrežama vozila *beacon* poruke se koriste na aplikacijskoj razini za razliku od MANET-a kada se koriste na mrežnoj razini [33]. Proučavanjem literature koja se bavi ovom tematikom uočeno je da se *beacon* poruke šalju u različitim intervalima, od 0.1 s do 5 s. Manji intervali znače da će dobivene informacije o susjedima biti novije, no u situacijama s velikom gustoćom prometa (npr. u gužvama i zastojima u gradovima) manji interval slanja *beacon* poruka ipak može dovesti do opterećenja i zagušenja mreže. U [34] autori uspoređuju protokole sa i bez slanja *beacon* poruke i zaključuju da oba pristupa imaju svoje prednosti i mane. U slučaju idealnog bežičnog signala s dobro podešenim parametrima sustava oba pristupa precizno propagiraju razasijane poruke. Ako su opći troškovi *beacon* poruka zanemarivi, protokoli koji koriste *beacon* poruke učinkovitiji su u smislu iskorištenosti kanala. Protokoli koji ne šalju *beacon* poruke robusniji su u smislu pogrešaka bežičnog kanala. U predloženom algoritmu testirani su sljedeći intervali za slanje *beacon* poruka: 0.1 s, 1 s, 2 s i 5 s. Simulacijske postavke prikazane su u tablici 3.1.

Na slici 3.12 prikazani su rezultati usporedbe prosječne pokrivenosti mreže porukama za sva četiri testirana *beacon* intervala slanja poruka. Za gustoće vozila LD i MD prosječna pokrivenost značajno je veća u slučaju kada je korišten interval slanja *beacon* poruka u trajanju od 1 s. Kod gustoće vozila LD prosječna pokrivenost iznosi 5.28% što znači da će od ukupno 50 vozila u mreži prosječno 2-3 primiti poruku. Uzrok tomu je što je mreža vrlo velika, a broj vozila jako mali i najčešće vozila u svojoj okolini imaju vrlo mali broj susjeda ili ih uopće nemaju. Kod gustoće vozila MD s *beacon* intervalom od 1 s prosječna pokrivenost mreže je za 9-10 vozila veća u odnosu na *beacon* interval od 0.1 s, za 15 vozila u odnosu na *beacon* interval od 2 s te za 30 vozila veća u odnosu na *beacon* interval od 5 s. Kada je u mreži velika gustoća vozila HD, najveća je pokrivenost prilikom korištenja intervala slanja *beacon* poruka u trajanju od 0.1 s. Ipak, u tako gustoj mreži korištenje malog intervala slanja *beacon* poruka znači da će biti poslan i primljen vrlo veliki broj *beacon* poruka što će značajno smanjiti mrežnu propusnost koja više neće biti dostupna za slanje podatkovnih poruka ili poruka višeg prioriteta te može dovesti do prekida ili grešaka u radu mreže.



Slika 3.12. Prosječna pokrivenost mreže za različite *beacon* intervale

Na slici 3.13 prikazano je prosječno kašnjenje po poruci u mreži za sva četiri testirana *beacon* intervala slanja poruka.

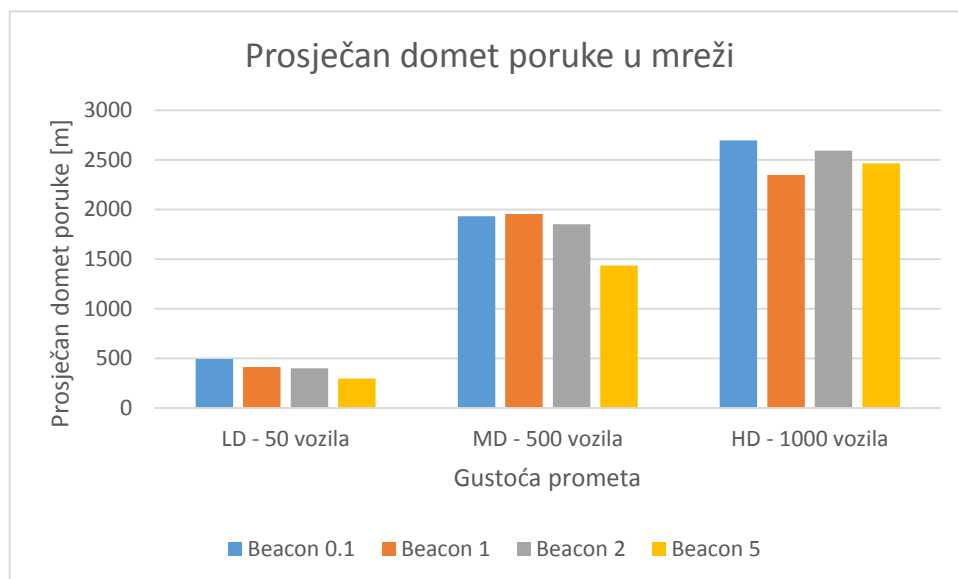


Slika 3.13. Prosječno kašnjenje po poruci u mreži za različite *beacon* intervale

Za gustoće vozila LD i HD u mreži prilikom korištenja intervala slanja *beacon* poruka u trajanju od 1 s prosječno je kašnjenje značajno manje u odnosu na ostale *beacon* intervale. Kod gustoće vozila LD kašnjenje iznosi 2.69 ms u usporedbi s *beacon* intervalom od 0.01 s gdje iznosi 4.59 ms. Kod HD gustoće vozila prosječno kašnjenje po poruci za *beacon* interval od 1 s iznosi 20.20 ms, a u ostalim je *beacon* intervalima značajno duži. U *beacon* intervalu od 0.1 s iznosi 22.65 s, u *beacon* intervalu od 2 s 24.62 ms, a u *beacon* intervalu od 5 s 25.69 ms. Ova

razlika u kašnjenju još je značajnija zbog vrlo velike gustoće vozila prilikom koje se pošalje i proslijedi ogroman broj poruka koje dostižu velike udaljenosti od čvora na kojemu su nastale. Zbog toga u gustoći vozila HD veliko kašnjenje uzrokuje duži boravak poruke u mreži što dodatno zagušuje mrežu i smanjuje propusnost. U scenarijima s gustoćom vozila MD kašnjenje je najmanje i približno isto za *beacon* intervale od 0.1 s i 1 s, za *beacon* interval od 5 s je za 1 ms duže, a za interval od 2 s preko 2 ms duže.

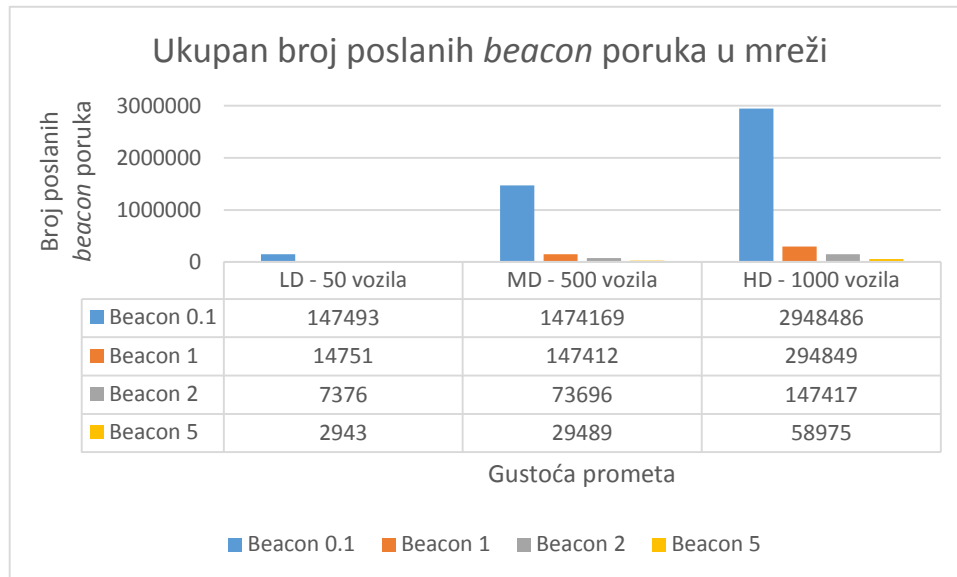
Prosječan domet poruke na slici 3.14 varira u različitim gustoćama prometa. Za gustoću LD za *beacon* interval od 0.1 s najveći je i iznosi 494.29 m, za *beacon* intervale od 1 s i 2 s približno je isti i iznosi nešto više od 400 m, a za *beacon* interval od 5 s najmanji je i iznosi 298.35 m. Za gustoću vozila MD prosječan domet poruke najveći je za *beacon* interval od 1 s (1953.25 m), nešto manji za *beacon* interval od 0.1 s (1930.98 m), još manji za *beacon* interval od 2 s (1851.51 m) i uvjerljivo najmanji za najveći *beacon* interval od 5 s (1436.03 m). U najvećoj gustoći vozila HD prosječni domet poruke najveći je za *beacon* interval od 0.1 s (2694.98 m), a najmanji za *beacon* interval od 1 s (2347.53 m), a za ostala je dva *beacon* intervala između ovih vrijednosti.



Slika 3.14. Prosječan domet poruke u mreži za različite *beacon* intervale

Iako su *beacon* poruke najčešće male i zanemarive veličine, važan podatak je i broj poslanih *beacon* poruka. Proporcionalan je duljini trajanja *beacon* intervala i najveći je za *beacon* interval od 0.1 s koji je u odnosu na *beacon* interval od 1 s 10 puta veći, u odnosu na *beacon* interval od 2 s 20 puta veći te u odnosu na *beacon* interval od 5 s 50 puta veći. Ovo je posebno izraženo u gustoći vozila HD gdje se u *beacon* intervalu od 0.1 s pošalje ukupno 2948486

beacon poruka unutar trajanja simulacije od 300 s što može značajno opteretiti mrežu i smanjiti propusnost (slika 3.15). U gustoći prometa MD taj je broj također velik i iznosi 1474169. Stoga ovako mali period slanja *beacon* poruka od samo 0.1 s nije pogodan za korištenje jer unosi dodatno opterećenje u mrežu.



Slika 3.15. Ukupan broj poslanih *beacon* poruka u mreži za različite gustoće vozila

Proučavanjem simulacijskih rezultata može se zaključiti da je optimalno korištenje *beacon* intervala od 1 s jer daje najbolji omjer performansi i troškova slanja *beacon* poruka. S obzirom da je jedan od glavnih ciljeva predloženog algoritma smanjivanje ukupnog kašnjenja u dostavljanju poruka prosječno kašnjenje po poruci vrlo je bitno mjerilo vrednovanja i stoga se uzima s većom važnosti. *Beacon* interval od 1 s pokazuje značajno manje kašnjenje u odnosu na ostale intervale. Prosječna pokrivenost mreže u tom *beacon* intervalu najveća je za gustoće prometa LD i MD, a za gustoću HD je najmanja. Slična situacija je i u prosječnom dometu poruka gdje *beacon* interval od 1 s pokazuje vrlo dobre rezultate, a za gustoću HD su nešto slabiji. Broj poslanih *beacon* poruka nije zanemariv podatak ako se radi o velikom broju kao u malom *beacon* intervalu od samo 0.1 s koji nije pogodan za korištenje jer unosi dodatno i nepotrebno opterećenje za mrežu i ne pruža puno bolje performanse u smislu bolje pokrivenosti i dometa ili manjeg kašnjenja. Ostala dva *beacon* intervala od 2 s i 5 s imaju još manji broj *beacon* poruka, ali razlika nije toliko velika i performanse su većinom bolje u *beacon* intervalu od 1 s koji je zbog toga odabran za sve daljnje simulacije i mjerenja performansi u disertaciji.

Struktura *beacon* poruke korištene u disertaciji prikazana je na slici 3.16, a u programskom kodu 3.1 prikazana je metoda *onBeacon()* za rad s *beacon* porukama. Uz standardne

informacije koje se mogu naći u literaturi ([33] i [34]) o ID-u, imenu, prioritetu, adresi primatelja i GPS lokaciji dodano je i polje koje sadrži informacije o trenutnom broju 1-skok susjeda čvora koji šalje *beacon* poruku. Ovaj podatak je vrlo važan u doprinosima u disertaciji te je jedan od ključnih čimbenika prilikom odabira razašiljača jer pruža informaciju o broju potencijalnih primatelja poruke u drugom skoku.

ID	Ime	Prioritet	Adresa primatelja (ID primatelja ili 0 za <i>razašiljanje</i>)	GPS koordinate trenutne pozicije	Broj 1-skok susjeda
----	-----	-----------	---	----------------------------------	---------------------

Slika 3.16. Struktura *beacon* poruke

```

void VVID_V2V::onBeacon(WaveShortMessage* wsm) {

    int newNeighbour = 1;
    for (unsigned int i = 0; i < neighboursVector.size(); i++) {
        if (neighboursVector[i].neighborID == wsm->getSenderAddress()) {
            neighboursVector.erase(neighboursVector.begin() + i);
            newNeighbour = 0;
            break;
        }
    }

    for (unsigned int i = 0; i < neighboursVector.size(); i++) {
        if (neighboursVector[i].neighborArrivalTime < (simTime() -
            (1.5 * par("beaconInterval").doubleValue()))) {
            neighboursVector.erase(neighboursVector.begin() + i,
                neighboursVector.begin() + neighboursVector.size());
            break;
        }
    }

    neighboursStruct n1 = {wsm->getSenderAddress(), wsm->getArrivalTime(), this->curPosition.distance(wsm->getSenderPos()), wsm->getSenderPos(), wsm->getNeighboursNumber(), 0, 0};
    neighboursVector.insert(neighboursVector.begin(), n1); }

```

Programski kod 3.1. Programski kod metode *onBeacon()* za rad s primljenim *beacon* porukama

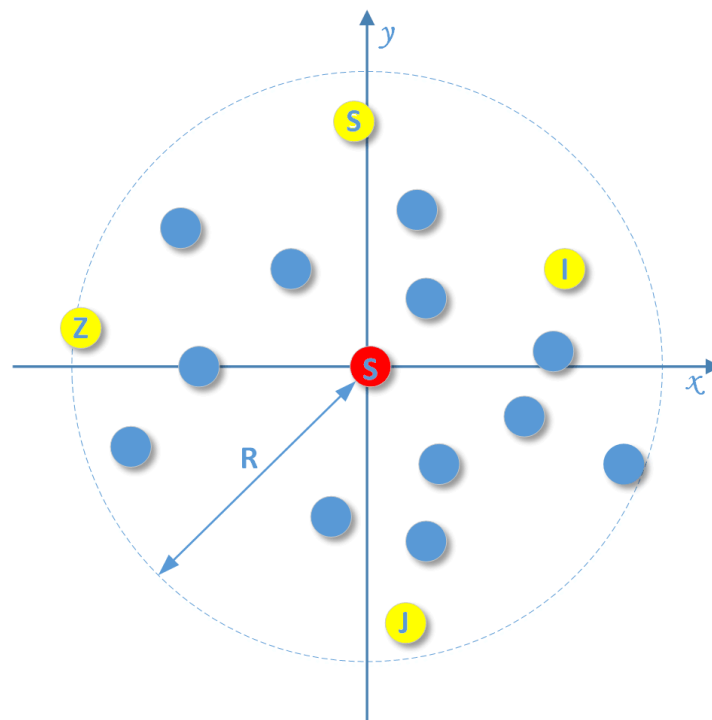
Metoda *onBeacon()* (programski kod 3.1) za rad s *beacon* porukama dio je velike programske cjeline u kojoj je implementiran algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovan na njihovom trenutnom položaju. Nakon što *beacon* poruka stigne do vozila, ova se metoda automatski aktivira i prvo provjerava je li pristigla

beacon poruka od novog ili starog susjeda. Ako je primljena od starog susjeda, brišu se podaci o njemu u listi susjeda. Nakon toga se brišu svi podaci u listi susjeda koji su stariji od $1.5 * beacon_interval$ jer su to stare informacije i ako se stari susjed nije javio jedan i pol interval slanja *beacon* poruka, znači da više nije u dometu i da više nije 1-skok susjed i zato se brišu njegove informacije. Na kraju metode se podaci o susjedu, bio on novi ili stari, stavljaju u strukturu koja se pohranjuje u listu čvora *neighboursVector*. Sa svim susjedima s te liste čvor može izravno komunicirati. Veličina liste susjeda daje informaciju o lokalnoj gustoći i na temelju tog podatka može se odrediti u kakvoj se okolini nalazi čvor.

3.3.2. Metoda usmjerena prema pošiljatelju

U prvoj metodi usmjerenoj prema pošiljatelju pošiljatelj u prvom koraku prilikom slanja podatkovne poruke odabire četiri najbolja razašiljača na temelju njihove lokacije i broja 1-skok susjeda ako ima susjeda u vlastitoj listi susjeda kao što je prikazano na slikama 3.17 i 3.18 te u algoritmu 3.2. Pošiljatelj prvo prolazi kroz listu susjeda i svakom susjedu dodjeljuje vrijednost ranga N_{RANG} na temelju izraza (3-9):

$$N_{RANG\ i} = \alpha * D_i + N_{SS\ i} \quad (3-9)$$



Slika 3.17. Prikaz prvog koraka metode usmjerene prema pošiljatelju u V2V modelu komunikacije

U izrazu (3-9) D_i je euklidska udaljenost do i -tog susjeda prikazana u izrazu (3-10), a vrijednost koeficijenta α dobivena je eksperimentalno i u simulacijama iznosi 0.15. N_{SS} je veličina liste susjeda pošiljatelja.

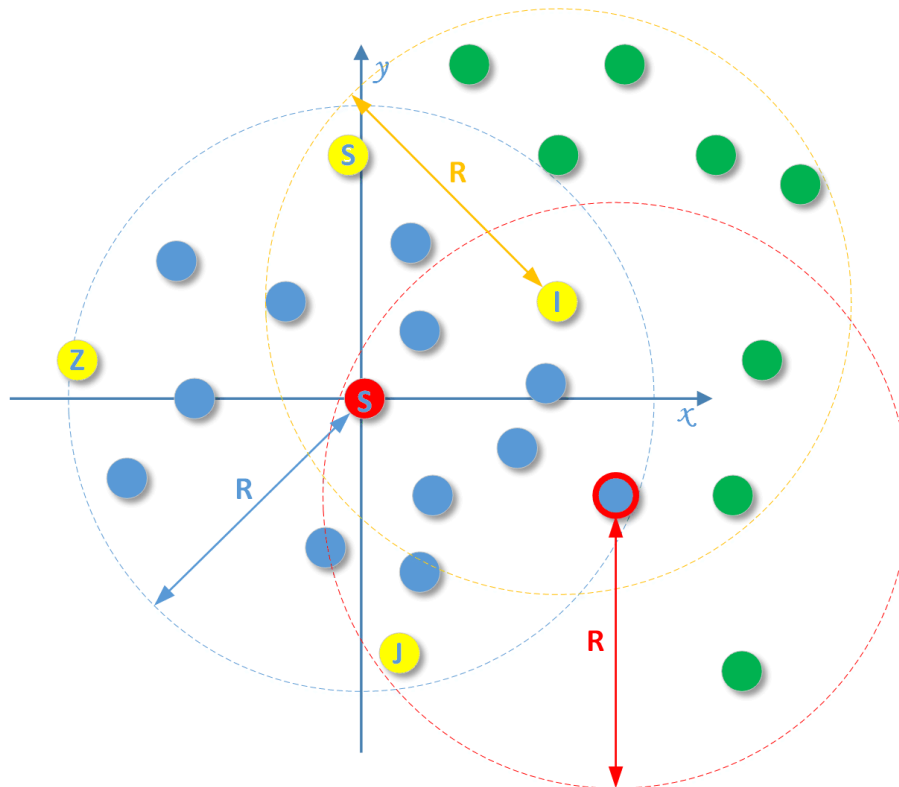
$$D_i(T_1, T_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3-10)$$

Algoritam 3.2. Algoritam za odabir četiri najbolja razašiljača

```

1: Za (i=0; i<NSS; i++)
2: Ako je susjed_i.GPS.y < (max_GPS.y + 0.2*R) && susjed_i.NRANG > max_RANG
3:   Najsjeverniji_čvor = čvor_i;
4: Ako je susjed_i.GPS.x > (max_GPS.x - 0.2*R) && susjed_i.NRANG > max_RANG
5:   Najistočniji_čvor = čvor_i;
6: Ako je susjed_i.GPS.y > (min_GPS.y - 0.2*R) && susjed_i.NRANG > max_RANG
7:   Najjužniji_čvor = čvor_i;
8: Ako je susjed_i.GPS.x < (min_GPS.x + 0.2*R) && susjed_i.NRANG > max_RANG
9:   Najzapadniji_čvor = čvor_i;

```



Slika 3.18. Prikaz prvog koraka metode usmjerene prema pošiljatelju u V2V modelu komunikacije s okolinom istočnih čvorova

Nakon toga pošiljalatelj ponovno prolazi kroz listu susjeda i na temelju dvaju uvjeta prikazanih u algoritmu 3.2 određuje koja će četiri susjeda biti odabrana kao najsjeverniji (*S*), najjužniji (*J*), najistočniji (*I*) i najzapadniji (*Z*) razašiljač. Budući da u SUMO simulatoru prometa koordinatni sustav ima ishodište u gornjem lijevom kutu, najveće i najmanje *x* i *y* koordinate vozila gledaju se u odnosu na gornju lijevu točku. U prvom uvjetu za sva četiri razašiljača uspoređuju se *x* ili *y* koordinate *i*-tog susjeda s onim koji trenutno ima najveću ili najmanju *x* ili *y* koordinatu s odstupanjem od 20% ($0.2 \cdot R$; *R* je komunikacijski domet signala pošiljalatelja). Ovo nije dovoljan uvjet da bi neki čvor postao najistureniji čvor, nego se mora zadovoljiti i drugi uvjet prema kojemu vrijednost ranga *i*-tog vozila mora biti veća od trenutne. Izračun vrijednosti ranga prikazana je u izrazu (3-9). Kao što je prikazano na slici 3.17 odabrana su četiri razašiljača, a najistočniji razašiljač *I* nije i po koordinatama najistočniji jer je okolina najistočnijeg čvora po GPS poziciji rjeđa od okoline odabranog čvora što se može vidjeti na slici 3.18.

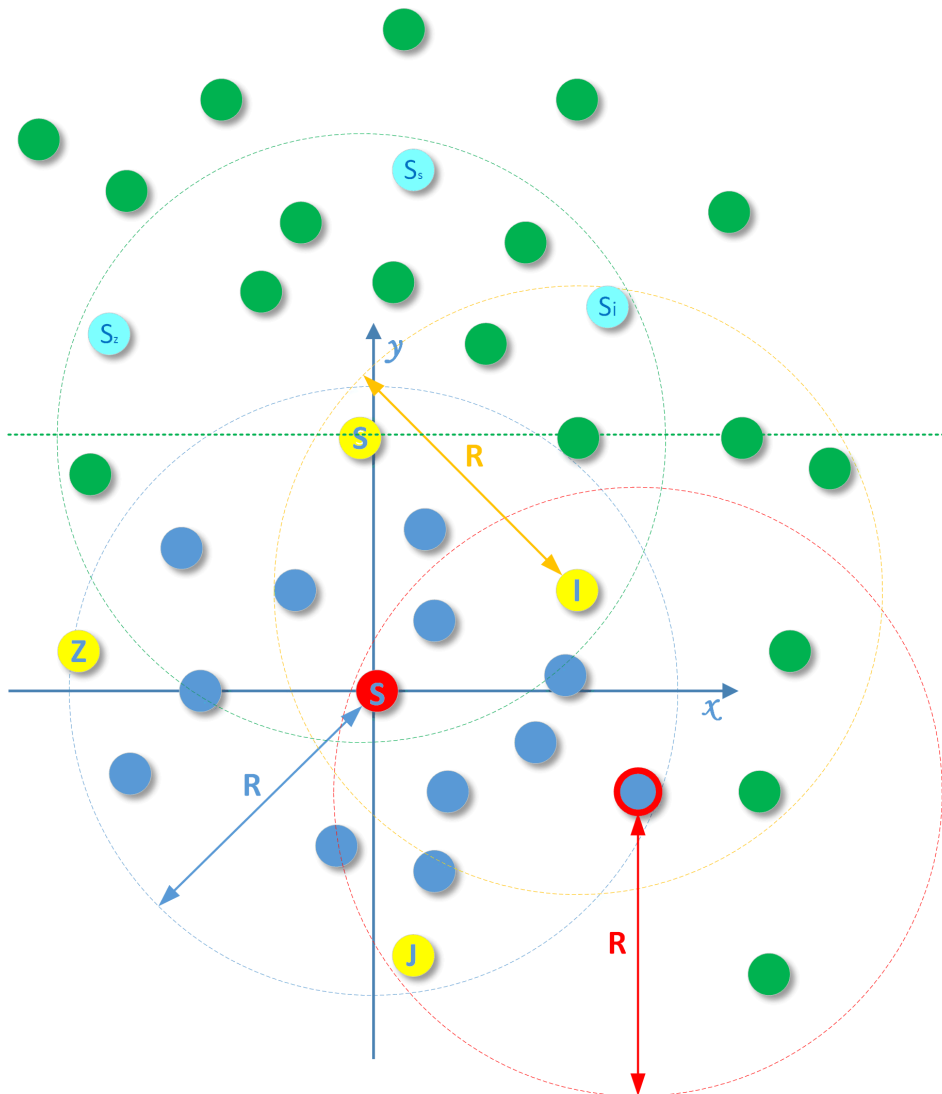
Algoritam 3.3. Algoritam za odabir tri najbolja razašiljača u drugom koraku prve metode

```

1: Ako je čvor.psID==S
2:   Za (i=0;i<NSS;i++)
3:     Ako je susjed_i.GPS.y<čvor_i
4:       Pozovi Algoritam 3.2
5:     Odaberi Najsjeverniji, Najzapadniji i Najistočniji susjed
6:
7: Ako je čvor.psID==Z
8:   Za (i=0;i<NSS;i++)
9:     Ako je susjed_i.GPS.x<čvor_i
10:      Pozovi Algoritam 3.2
11:     Odaberi Najjužniji, Najzapadniji i Najsjeverniji susjed
12:
13:Ako je čvor.psID==J
14:  Za (i=0;i<NSS;i++)
15:    Ako je susjed_i.GPS.y>čvor_i
16:      Pozovi Algoritam 3.2
17:    Odaberi Najzapadniji, Najjužniji i Najistočniji susjed
18:
19:Ako je čvor.psID==I
20:  Za (i=0;i<NSS;i++)
21:    Ako je susjed_i.GPS.x>čvor_i
22:      Pozovi Algoritam 3.2
23:    Odaberi Najjužniji, Najistočniji i Najsjeverniji susjed

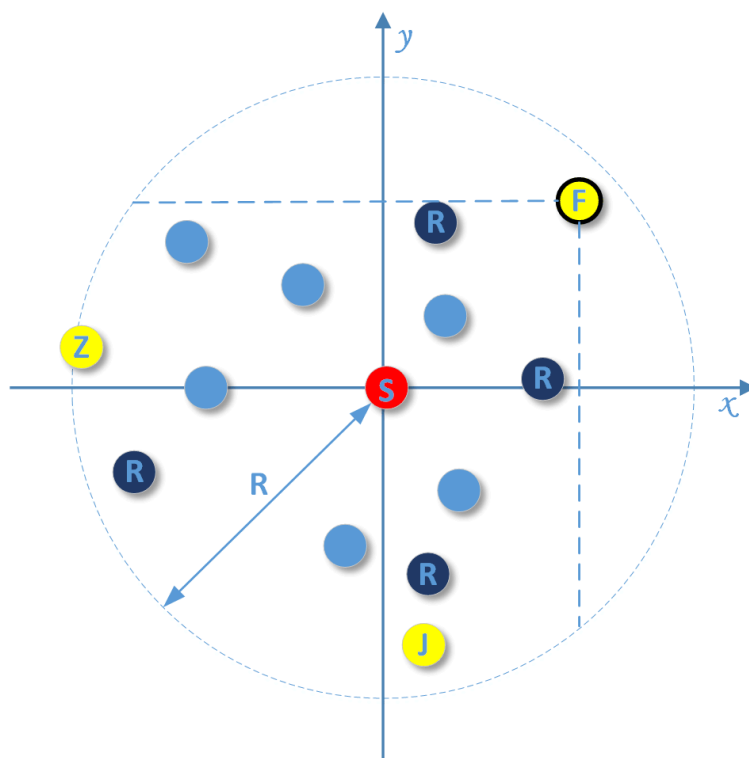
```

U drugom koraku prve metode četiri odabrana razasiiljača moraju dalje prosljediti primljenu poruku tako da svaki odabere tri razasiiljača prema algoritmu 3.3 i slici 3.19. Slijedi objašnjenje kako najsjeverniji razasiiljač S odabire svoja tri razasiiljača. Budući da je razasiiljač S najsjeverniji razasiiljač odabran od izvora, poruku treba širiti u tri smjera od izvora, na zapad, sjever i istok pa prema tome odabire ta tri razasiiljača. Sva tri razasiiljača moraju imati GPS poziciju sjevernije od njega da bi se poruke širile što više sjeverno, a ne južno jer bi se tako poruka vraćala nazad prema izvoru i stvarao bi se veći broj zalihosnih poruka. Za sve se ostale korake vrši odabir razasiiljača prema ovom pravilu. Ako neki od odabranih razasiiljača ne uspije prosljediti poruku, to se zanemaruje jer svaki razasiiljač odabran od izvora širi dalje poruke u tri smjera što stvara dovoljnu zalihost. U drugoj je metodi implementiran i mehanizam BackUp.

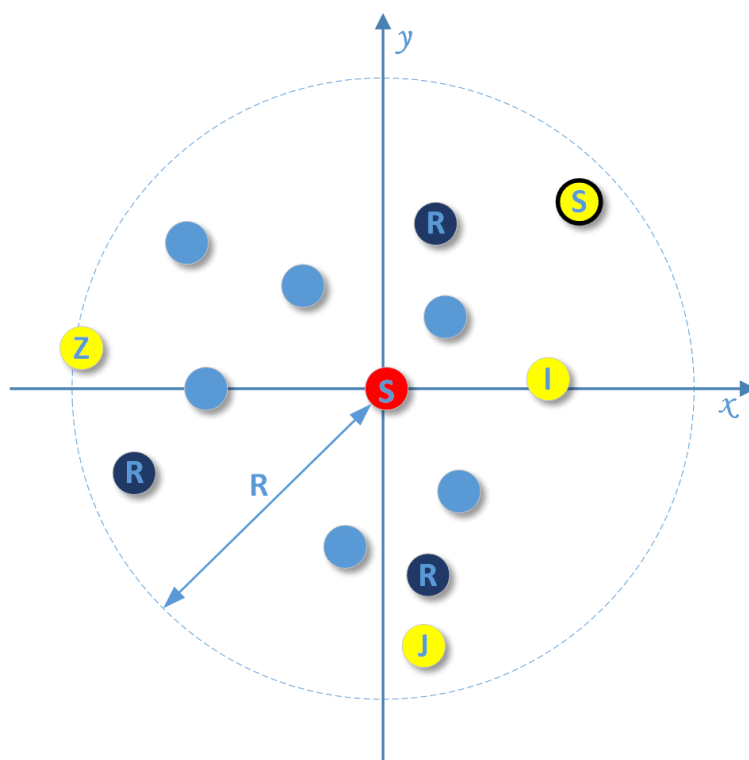


Slika 3.19. Prikaz drugog koraka metode usmjerene prema pošiljatelju u V2V modelu komunikacije

Prilikom implementacije ove metode pojavio se problem koji je nazvan „problem isturenih čvorova“ (slika 3.20) i koji je riješen odabirom zamjenskih čvorova (slika 3.21).



Slika 3.20. Problem isturenih čvorova



Slika 3.21. Odabir zamjenskih čvorova

Tijekom izvršavanja simulacija opaženo je da se u velikom broju slučajeva prilikom odabira razasiiljača dogodi da su neki susjedni čvorovi istureniji od drugih po dvije osi. Naime, čvor F je istureniji od svih čvorova po osi X prema istoku i po Y osi prema sjeveru. Zbog toga je on odabran i kao razasiiljač I prema istoku i kao razasiiljač S prema sjeveru. To dovodi do gubitka jednog razasiiljača pa su uvedeni takozvani zamjenski čvorovi kao što je prikazano na slici 3.21 Svaki odabrani razasiiljač ima definirani zamjenski čvor i ako se dogodi na kraju algoritma za odabir razasiiljača da je jedan čvor odabran za dvije strane, aktivira se jedan zamjenski čvor. U ovome će primjeru čvor F postati čvor S , a aktivirat će se zamjenski čvor I za istočnu stranu. Ovo je implementirano u svim koracima algoritma prilikom razasiiljanja poruka.

3.3.3. BackUp metoda usmjerena prema primatelju

Druga metoda V2V komunikacijskog modela nazvana je metoda BackUp. U njoj se koristi pristup usmjeren prema primatelju u kojemu primatelji koji se nalaze u „dobroj“ poziciji mogu sami odlučiti hoće li proslijediti primljenu poruku ili ne. Naime, kada čvor primi podatkovnu poruku, pokreće se programska metoda *onData()* u kojoj se prvo provjerava je li poruka nova ili već postoji u spremniku poruka. Ako postoji u spremniku poruka, ignorira se, a ako je nova, sprema se u spremnik poruka. U istoj programskoj metodi provjerava se i je li čvor odabran kao razasiiljač, a ako je, pokreće se procedura razasiiljanja poruka i odabira daljnjih razasiiljača na temelju strane za koju je čvor zadužen. Ako pak čvor nije odabran kao razasiiljač, provjeravaju se njegove karakteristike dvama koracima da bi se provjerilo zadovoljava li uvjete da postane čvor BackUp kao što je prikazano u algoritmu 3.4.

Algoritam 3.4. Algoritam za provjeru uvjeta BackUp čvorova

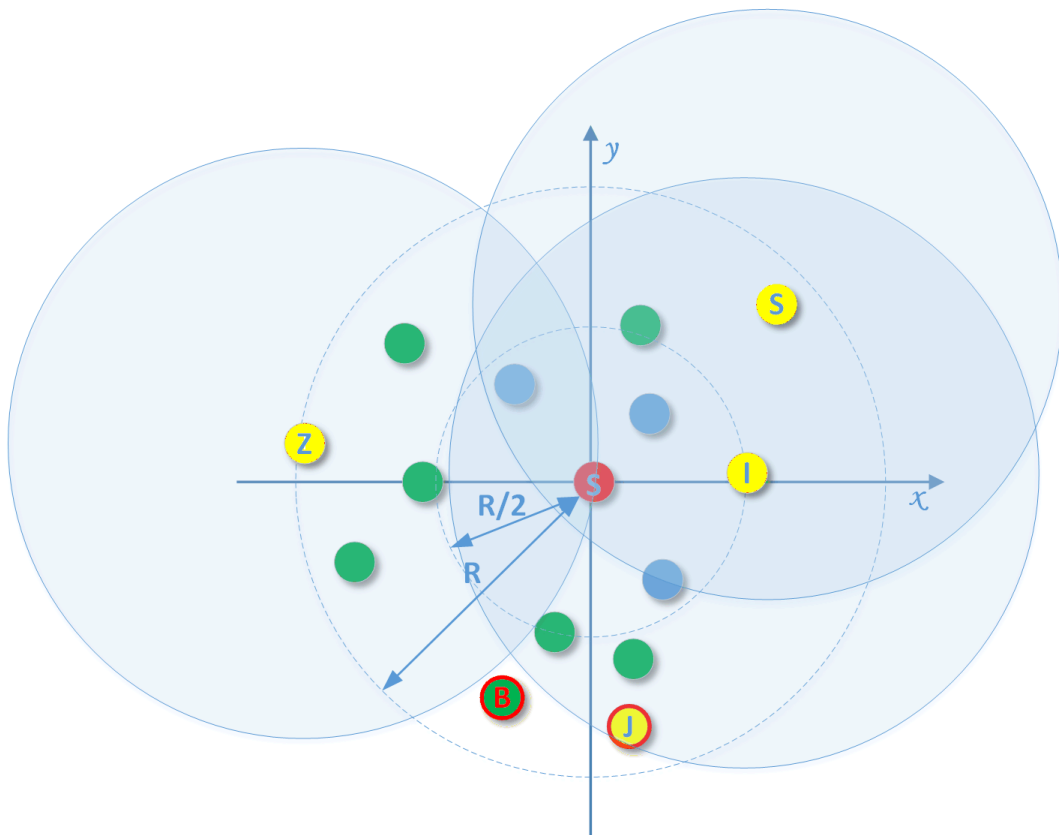
```

1: Ako je  $\text{čvor.udaljenost} > 0.5 * R \ \&\& \ N_{SS} > 3$ 
2:   Ako je  $\text{poruka.psID} == 0$  |
3:     ( $\text{poruka.psID} == S \ \&\& \ \text{čvor.GPS.y} < \text{pošiljate.GPS.y}$ ) | |
4:     ( $\text{poruka.psID} == Z \ \&\& \ \text{čvor.GPS.x} > \text{pošiljate.GPS.x}$ ) | |
5:     ( $\text{poruka.psID} == J \ \&\& \ \text{čvor.GPS.y} > \text{pošiljate.GPS.y}$ ) | |
6:     ( $\text{poruka.psID} == I \ \&\& \ \text{čvor.GPS.x} < \text{pošiljate.GPS.x}$ )
7:     Čekaj 0.01s
8:     Ako ista poruka nije primljena
9:       Odredi  $\text{psID}$  //  $\text{psID}$  - strana čvora
10:      Pokreni proceduru razasiiljanja poruke
11:      Inače ignoriraj

```

U prvom se koraku prvo provjerava je li čvor udaljen najmanje $0.5 \cdot R$ od čvora od kojeg je dobio poruku. Ovim se uvjetom smanjuje broj zalihosnih poruka jer svi čvorovi koji su blizu čvoru koji je poslao poruku vrlo vjerojatno imaju velik broj istih susjeda kao i on. Zatim se provjerava je li njegov spremnik susjeda veći od tri jer ako nije, vjerojatno je riječ o dvama izoliranim čvorovima koji su odsječeni od ostatka mreže. U drugom koraku se mora zadovoljiti jedan od sljedećih uvjeta:

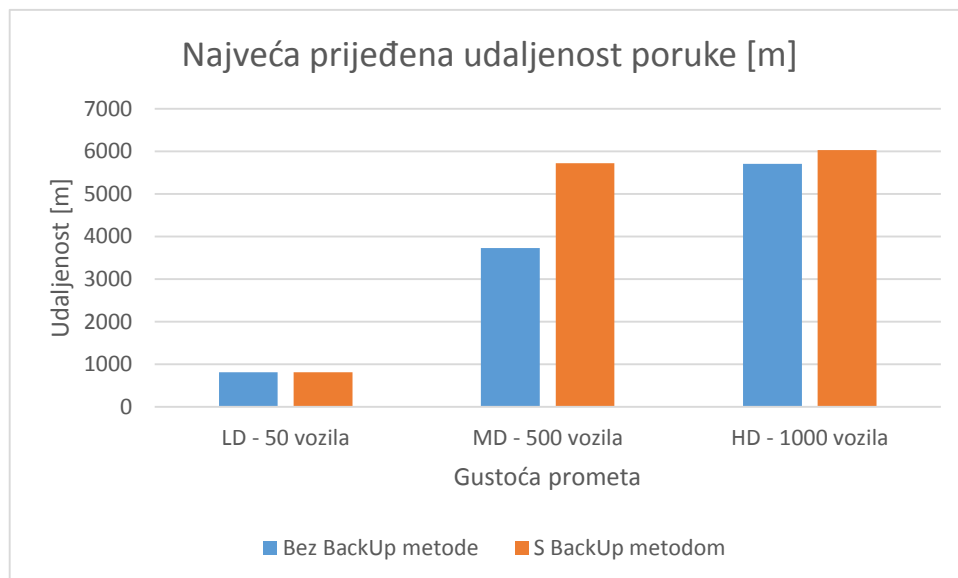
- poruka je poslana izravno s izvornog čvora
- ako je poruka poslana s najsjevernijeg razasijljača S , pozicija čvora BackUp mora biti sjevernije od njega
- ako je poruka poslana s najzapadnijeg razasijljača Z , pozicija čvora BackUp mora biti zapadnije od njega
- ako je poruka poslana s najjužnijeg razasijljača J , pozicija čvora BackUp mora biti južnije od njega
- ako je poruka poslana s najistočnijeg razasijljača I , pozicija čvora BackUp mora biti istočnije od njega.



Slika 3.22. Scenarij za odabir čvorova BackUp

Ako su zadovoljeni gore navedeni uvjeti, čvor identificira sebe kao čvor BackUp i čeka 0.01 s da vidi hoće li opet primiti istu poruku. Interval odgode od 0.01 s dobiven je mjerenjima u simulatoru jer će unutar ovog intervala stići i poruke od najudaljenijih susjeda. Razlog ove odgode je da ako unutar ovog intervala ista poruka stigne još jednom, znači da se u blizini čvora nalazi jedan od razošiljača i čvor ne mora proslijedit poruku jer će doći do zalihosti. Suprotno tomu, ako u intervalu odgode ne stigne ista poruka još jednom, u blizini čvora nema razošiljača i ova se poruka neće širiti u tom smjeru, a čvor će postati razošiljač ako zadovoljava određene uvjete. Tada će se pokrenuti procedura razošiljanja kao i za svaki drugi razošiljač, a čvor BackUp će poprimiti onu stranu razošiljanja na kojoj se nalazi. U simulacijama je primijećeno da vozila tijekom simulacije pošalju značajni broj poruka BackUp. Razlog tomu može biti slučaj koji je prikazan na slici 3.22. Naime, ako jedan od razošiljača uslijed neke greške ne proslijedi primljenu poruku, neće ju svi čvorovi koji su komunikacijskom dometu od pošiljatelja primiti dva puta i to je znak da je vrlo vjerojatno jedan od razošiljača zakazao.

Napravljen je skup simulacija da bi se dokazala korisnost metode BackUp u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka prilikom korištenja V2V modela komunikacije. Simulacije su provedene korištenjem okoline i simulacijskih postavki kao što je prikazano u tablici 3.1. Na slici 3.23 prikazani su rezultati za tri gustoće vozila u mreži (LD, MD i HD) za najveću prijedenu udaljenost neke poruke s i bez korištenja metode BackUp u istim uvjetima i okolini.

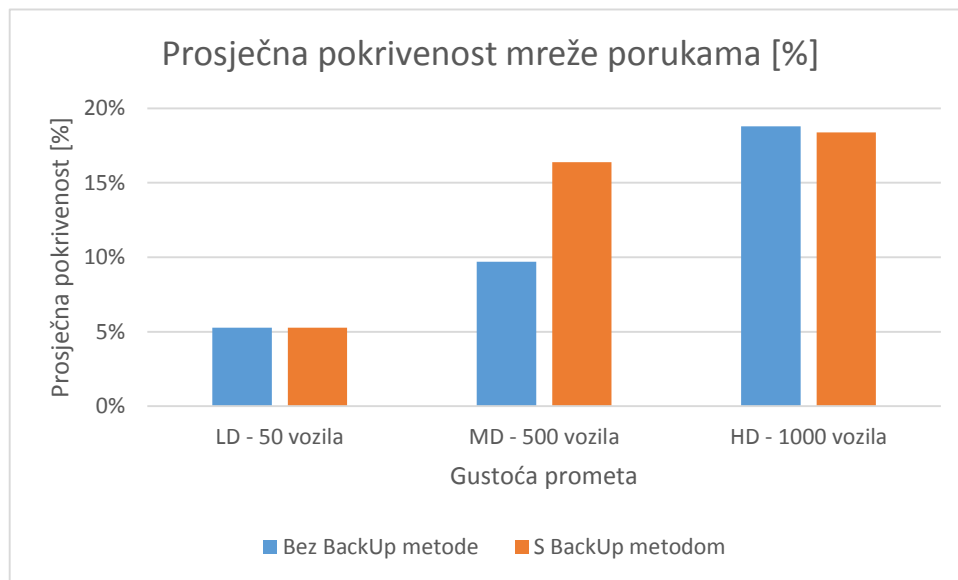


Slika 3.23. Najveća prijedena udaljenost poruke s i bez BackUp metode

Usporedbom dobivenih rezultata može se vidjeti da za gustoću prometa HD, a posebno za gustoću prometa MD, metoda BackUp daje bolje rezultate dok je za gustoću prometa LD

rezultat identičan. Najveća udaljenost koju je neka poruka prešla za gustoću MD u simulacijama bez metode BackUp iznosi 3731.53 m, a s metodom BackUp je značajno veća i iznosi 5725.54 m. Kod gustoće HD ta razlika nije toliko velika i iznosi 323.46 m.

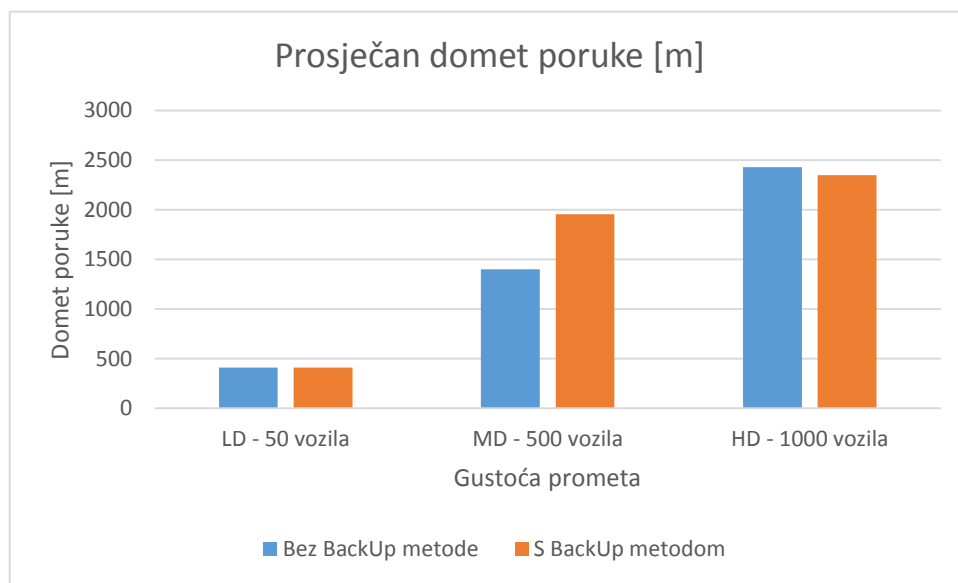
Na slici 3.24 prikazana je prosječna pokrivenost mreže porukama s i bez BackUp metode. Za gustoću vozila LD identična je, za gustoću HD je neznatno manja ukoliko je korištena metoda BackUp, a za gustoću MD prosječna pokrivenost mrežom je gotovo dva puta veća (9.69% bez metode BackUp i 16.38% s metodom BackUp). Prema tome može se zaključiti da u slučaju velike gustoće prometa, metoda BackUp ne omogućava poruci da dođe do većeg broja vozila u mreži. Razlog tomu je što je zbog velike gustoće prometa mreža dobro povezana pa poruke dopiru do velikog broja vozila i ako neki razasiljači uslijed pogreške zakažu i ne prosljede poruku.



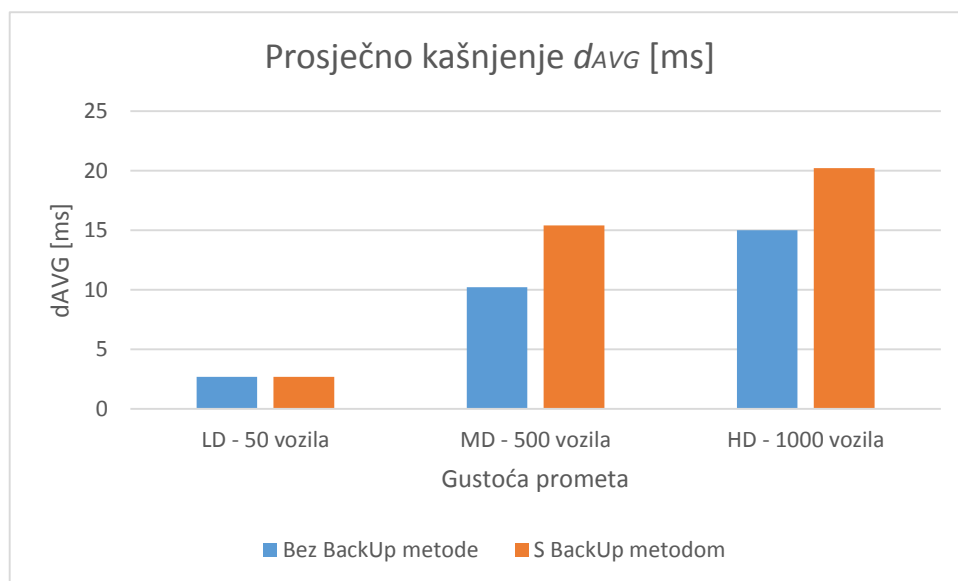
Slika 3.24. Prosječna pokrivenost mreže porukama s i bez BackUp metode

Na slici 3.25 prikazan je prosječan domet poruke od izvora do ostalih vozila s i bez metode BackUp. Kao i kod prosječne pokrivenosti mreže za gustoću prometa LD domet je identičan, za HD je oko 3.4% manji, a za gustoću prometa MD značajno veći i iznosi 1953.25 m u odnosu na slučaj bez metode BackUp gdje iznosi samo 1401.54 m. Prosječan domet poruke automatski se odražava na broj čvorova koji će primiti poslanu poruku što je vidljivo na slici 3.24. Na slici 3.26. prikazani su rezultati prosječnog kašnjenja u dostavljanju poruka u mreži. Za gustoću vozila LD rezultat je kao i na slikama 3.23 i 3.24 identičan. Za gustoće prometa MD i HD kašnjenje je veće s metodom BackUp nego bez nje. Ovaj rezultat nije iznenađujući i na njega utječu dva čimbenika. Prvi se odnosi na interval odgode od 0.01 s koji je prikazan u algoritmu

3.4 i zbog kojega svaki čvor koji zadovoljava uvjete da postane čvor BackUp, mora za svaku poruku čekati interval odgode prije razošiljanja da bi se uvjerio da u njegovoj blizini nema drugih razošiljača. Interval odgode unosi kašnjenje u algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka, ali je potreban jer bi se inače broj zalihosnih poruka značajno povećao. Drugi čimbenik koji utječe na ovaj rezultat je činjenica da s metodom BackUp poruke imaju veći domet i primljene su na većem broju vozila u odnosu na metodu bez korištenja čvorova BackUp za što je potrebno duže vrijeme dostavljanja poruka.



Slika 3.25. Prosječan domet poruke u mreži s i bez BackUp metode



Slika 3.26. Prosječno kašnjenje po poruci u mreži s i bez BackUp metode

Na svim grafovima rezultati za gustoću vozila LD identični su i pronađen je uzrok takvom ponašanju. Naime, u simulacijama s uključenom metodom BackUp prilikom testiranja u gustoći prometa LD niti jedan čvor nije zadovoljio uvjete da postane čvor BackUp i stoga niti jedna dodatna poruka nije razašiljana u odnosu na metodu bez čvorova BackUp. Razlog tomu je što je gustoća prometa vrlo mala i okolina pojedinog čvora je u većini slučajeva manja od četiri te su svi susjedni čvorovi automatski odabrani kao razošiljači pa nije bilo ostalih čvorova koji bi mogli preuzeti ulogu čvora BackUp. U gustoći vozila MD s metodom BackUp ukupno je 120 vozila zadovoljilo uvjete i prosljedilo poruke kao čvorovi BackUp. Kao što se može vidjeti u rezultatima mjerenja to je donijelo velika poboljšanja u performansama, a jedini kompromis je povećano prosječno kašnjenje u dostavi poruka, no objašnjeni su razlozi zbog kojih se kašnjenje pojavljuje i to se ne smatra nedostatkom. U simulacijama s gustoćom prometa HD ukupno je poslano 327 poruka, ali one nisu donijele bolje performanse, osim malo većeg maksimalnog dometa poruke. Razlog tomu je što je u okolini HD velika gustoća mreže koja osigurava dobru povezanost vozila koja uzrokuje da pokrivenost mreže porukama bude velika. Može se zaključiti da za gustoće prometa LD i HD nema poboljšanja u performansama prilikom korištenja metode BackUp, no zato su u slučajevima s gustoćom prometa MD ta poboljšanja značajna. Budući da je srednja gustoća prometa MD najčešća u stvarnim okolinama tijekom dana, može se zaključiti da je BackUp metoda korisna u većini slučajeva i stoga je korištena u narednim simulacijama. Gustoća vozila HD tipična je u dijelovima dana kada većina ljudi ide na posao i vraća se s posla, no ti periodi ne traju dugo. Gustoća vozila LD tipična je tijekom noći, najduže traje te je za osiguravanje bolje komunikacije u gustoći vozila LD korišten SCF model komunikacije. Tijekom implementacije pojavio se još jedan problem koji je nazvan „problem poslanih poruka“. Naime, kada čvor pošalje poruku, ona mu se vrati od odabranog razošiljača jer su oni u komunikacijskom dometu. Tada ju čvor pošiljatelj prepoznaje kao novu i sprema ju u svoj spremnik poruka. Zbog toga je ugrađen mehanizam koji prilikom slanja poruke generirane na nekom vozilu poruku pohranjuje u spremnik tog vozila kao što je prikazano u programskom kodu 3.2.

```
rcvDataMessagesStruct myDataMessage = {wsm->getSerial(), wsm->getId(),
wsm->getSenderAddress(), wsm->getSenderPos(), wsm->getTimestamp(), wsm-
>getArrivalTime(), wsm->getWsmData(), wsm->getPsid()};

rcvDataMessagesVector.insert(rcvDataMessagesVector.begin(),
myDataMessage);
```

Programski kod 3.2. Spremanje vlastitih poruka na izvornom čvoru

Struktura kreirane podatkovne poruke koja se koristi u prvom i drugom doprinosu prikazana je na slici 3.27. Uz ista polja kao i kod *beacon* poruke poput ID-a, imena, prioriteta, adrese primatelja i GPS lokacije, najvažnije i najveće polje su podaci. Općenito u tom polju može biti bilo što, no ako poruka sadrži multimedijalne podatke poput slike, zvuka i videa, njena će veličina biti prevelika i u dinamičnoj mreži kao što je ad-hoc mreža vozila postoji velika mogućnost da tako velike poruke neće biti dostavljene. Ostala bitna polja su vrijeme nastanka poruke pomoću kojeg se može odrediti nosi li poruka nove informacije ili ne. Važno polje je i serijski broj jer svaka poruka prilikom razaslanja gubi svoj ID i dobiva novi koji mora biti jedinstven u sustavu. Pomoću serijskog broja koji se kreira prilikom nastanka poruke i koji ostaje isti u sustavu cijelo vrijeme dok god postoji poruka, poruka se može identificirati bez obzira na to koliko je puta prosljeđena.

ID poruke	
Serijski broj	
Ime poruke	
Vrijeme nastanka poruke	
Inačica poruke (po definiciji 1)	
Podaci	
Prioritet	
Adresa primatelja (ID primatelja ili 0 za <i>razaslanje</i>)	
GPS koordinate trenutne pozicije	
GPS koordinate čvora gdje je poruka nastala	
PsID (određuje stranu razasiljača)	
Vektor odabranih razasiljača	
ID razasiljača	Strana razasiljača

Slika 3.27. Struktura podatkovne poruke

Inačica poruke je uobičajeno jednaka 1, no može postojati puno različitih podatkovnih poruka koje će biti identificirane u ovom polju. Uz GPS podatke trenutnog čvora s kojeg poruka dolazi pohranjeni su i GPS podaci lokacije gdje je poruka nastala jer u slučaju višestrukog razošiljanja ti podaci nisu isti. *PsID* je polje u kojemu je spremljena strana razošiljača te se koristi kod određivanje usmjerenja čvorova BackUp. U poruci se također nalazi vektor odabranih razošiljača u kojemu pošiljatelj poruke ili čvor koji razošilja poruku pohranjuje ID i stranu odabranih razošiljača. Kada susjedni čvorovi prime poruku prvi put, provjeravaju ovaj vektor i ako je njihov ID spremljen u vektoru, oni su odabrani kao razošiljači.

3.4. Opis korištenja SCF modela komunikacije u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka

Najveći nedostatak V2V modela komunikacije je što ne podržava komunikaciju između vozila koja su smještena u odvojenim dijelovima mreže s kojima ne postoji izravna veza i koja nisu u komunikacijskom dometu niti nakon višestrukih skokova. Da bi komunikacija između razdvojenih dijelova mreže bila moguća, potrebno je koristiti spremnik poruka na vozilima koji će omogućiti da poruke pohrane u vlastiti spremnik, da ih prenesu do razdvojenih dijelova mreže te da ih prosljede vozilima u tim dijelovima mreže (engl. *store-carry-forward*). Prednost ovog modela komunikacije je u tome što će poruke biti dostavljene do udaljenih i odvojenih dijelova mreže što znači da SCF model komunikacije tolerira isprekidanu povezanost što predstavlja jednu od glavnih karakteristika DTN mreža koje toleriraju kašnjenja. DTN mreže se obično opisuju s različitim izrazima poput eventualno, djelomično, prekidno ili prolazno povezane mreže, oportunističko umrežavanje ili prostorno-vremensko usmjeravanje. Svi izrazi opisuju mreže gdje ne postoji povezanost s kraja na kraj i gdje je komunikacija zahvaćena s prekidima i kašnjenjima koji su rezultat dijeljenja i isključenja mreže (engl. *partitions and disconnections*). Najbolji primjer DTN-a su MANET i ad-hoc mreže vozila jer se u takvim mrežama čvorovi pomiču i mrežna se struktura stalno mijenja. DTN mreže iskorištavaju povremena povezivanja kako bi se proširile poruke na udaljene dijelove mreže. Ona se sastoji od čvorova s dvosmjernim vezama (engl. *bidirectional links*) koje mogu biti prekinute uslijed mobilnosti ili neke greške. Kada su dva čvora spojena, mogu izmjenjivati poruke, no nedostaci su što je kašnjenje dostave poruka znatno veće u odnosu na V2V model komunikacije i vozila moraju imati veće spremnike poruka jer moraju prenositi primljene poruke i držati ih u spremniku duže vrijeme.

3.4.1. Tehnike usmjeravanja u DTN mrežama

Da bi se uklonili ili smanjili nedostaci i problemi vezani uz DTN mreže, potrebno je koristiti učinkovite protokole usmjeravanja. Kao što je opisano u [35] na temelju vremenskog razvoja mrežne topologije mogu biti kategorizirani kao protokoli usmjeravanja za mreže s determinističkim ili stohastičkim vremenskim razvojem. Ako je buduća topologija mreže potpuno poznata ili predvidiva, može se primijeniti determinističko usmjeravanje. Postoje tri različita pristupa:

- vremenski-prostorno usmjeravanje [36] – pretpostavka u ovome pristupu je da se karakteristike čvora mogu predvidjeti u nekom vremenskom intervalu T . Dinamičnost mreže se modelira kao vremensko-prostorni graf i algoritmi usmjeravanja odabiru najbolju rutu tako da gledaju „u budućnost“
- stablo [37] – u ovom pristupu stablo se formira od izvora dodavanjem čvorova djece i vremena koja su povezana s njima. Svaki čvor bilježi sve prethodne čvorove na kojima je poruka putovala i najranije vrijeme kada je došla na njih. Konačna putanja se može odabrati iz stabla odabiranjem najkraćeg vremena ili najmanjeg broja skokova potrebnih da se dođe do odredišta
- izmjena najkraćeg puta [38] – formiraju se tzv. „proročanstva znanja“ (engl. *knowledge oracles*) i na temelju njih se pronalazi najbolja ruta za dostavljanje poruka.

U dinamičkim mrežama u kojima je mrežno ponašanje slučajno buduća je mrežna topologija nepoznata i ne može biti predvidiva. Da bi poruke bile dostavljene od izvora do odredišta, trebaju se primijeniti protokoli usmjeravanja za stohastički vremenski razvoj mreža. Postoji pet različitih pristupa:

- epidemijско usmjeravanje (engl. *epidemic routing*) opisano u [39], [40], [41] i [42] – klasični primjer je poplavljanje porukama kroz mrežu. Ovakav je pristup resursno vrlo skup i može prouzrokovati mrežna zagušenja. Drugi je primjer dostavljanje poruka samo kada su izvor i odredište u komunikacijskom dometu. Iako ovaj način ima minimalne opće troškove, najčešće je kašnjenje vrlo veliko. Najbolji se rezultati postižu kombinacijom ovih dvaju primjera. Sljedeći je primjer usmjeravanje prskanjem. Prvo se pojedinačnim razašiljanjem poprskaju paketi blizu odredišta, a zatim višeodredišnim razašiljanjem u okolini zadnje poznate lokacije odredišta. Nadalje, dodavanjem prijenosnih čvorova između izvora i odredišta performanse epidemijskog usmjeravanja mogu biti značajno poboljšane.

- pristup temeljen na povijesti ili predviđanju [43], [44] – u ovom je pristupu vjerojatnost veze povezivanja razašiljanjem određena na temelju jednog skoka ili informacija s kraja na kraj. Čvorovi mogu ispitivati jedni druge kako bi naučili više o mrežnoj topologiji i kapacitetu čvorova i da bi donijeli inteligentne odluke usmjeravanja. Jedan skok informacije se obično dobivaju izmjenjujući podatke između dvaju čvorova kada se susretnu. Odabir se sljedećeg skoka može temeljiti na raznim mjerilima vrednovanja poput prostorne lokacije, propusnosti, relativne brzine/mobilnosti između dvaju čvorova, blizine kandidata, mogućnosti kandidata i vremenu prijenosa podataka.
- pristup zasnovan na modelu [45] – zasnovan je na modeliranju uzoraka kretanja pomičnih čvorova za bolji odabir prijenosnih čvorova i određivanje lokacije primatelja bez poplavljanja mreže. Npr. u ad-hoc mrežama vozila dva najčešće korištena modela prometa su autoceste i gradski promet.
- pristup temeljen na kontroliranju kretanja čvorova [46] i [47] – kontroliranje kretanja čvorova može poboljšati opće performanse sustava. Postoji nekoliko načina za kontroliranje mobilnosti čvorova poput prilagođavanja putanje čvorova, korištenja virtualnih čvorova koji putuju kroz mrežu te skupljaju i dostavljaju poruke, kontroliranja mobilnosti autonomnih agenata ili korištenje protokola Snake, Runners, DataMules i Message Ferries.
- pristup temeljen na kodiranju [48] i [49] – kodiranje brisanjem (engl. *erasure*) i mrežne tehnike kodiranja koriste se u ovom pristupu. U tehnikama kodiranja brisanjem, originalna poruka je kodirana u veći broj kodnih blokova, ali se može dekodirati i ako je primljen i manji broj kodnih blokova. S ovom se tehnikom najveće (engl. *worst case*) kašnjenje može značajno smanjiti. U mrežnom kodiranju prijenosni čvorovi umjesto da jednostavno prosljede pakete koje prime, mogu kombinirati neke primljene pakete i njih poslati kao novi paket. Korištenjem ove tehnike omjer uspješne isporuke paketa može biti mnogo veći.

U SCF modelu komunikacije predloženog algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka koristi se kombinacija pristupa koji su zasnovani na epidemijском usmjeravanju, modelu i kodiranju. Kombinacijom ovih pristupa želi se osigurati da poruke bude rasprostranjene što je moguće dalje od originalnog pošiljatelja u odvojene dijelove mreže te da se pri tome zadrži učinkovitost u smislu manjih kašnjenja, veće brzine rasprostiranja i manjeg broja zalihosnih poruka i posljedično manjeg zagušenja mreže.

3.4.2. Pregled metoda sa SCF modelom komunikacije u ad-hoc mrežama vozila

U nastavku su opisane poznatije metode iz literature koje koriste SCF model komunikacije za učinkovito rasprostiranje poruka u razdvojenim dijelovima mreže s kojima ne postoji izravna komunikacija jer nisu u komunikacijskom dometu niti nakon višestrukih skokova.

Metoda FBIMR (engl. *Ferry Based Interdomain Multycast Routing Scheme*) [50] koristi „trajekte“ kako bi se dostavile poruke višedredišnog razasijanja između odvojenih grupa. U radu se istražuje kako različite veličine spremnika, broj i brzina trajekta utječu na performanse dostavljanja poruka u ad-hoc mrežama vozila. Zaključili su da je s povećanjem veličine spremnika s 1000 na 2500 paketa omjer dostave poboljšán, ali prosječno kašnjenje je povećano i učinkovitost podataka je smanjena. Nadalje, kada je stopa paketa veća od 1 paket/s, omjer dostave je značajno povećán i kašnjenje je smanjeno. S povećanjem brzine trajekta s 15 m/s na 30 m/s omjer dostave je puno veći i kašnjenje je manje. Na temelju rezultata FBIMR metode u predloženom algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka koristi se veliki spremnik poruka jer doprinosi većoj pokrivenosti mreže.

DPIB (engl. *Data Pouring with Intersection Buffering*) [51] je sustav rasprostiranja podataka s infrastrukture prema vozilima korištenjem mehanizma spremanja poruka da bi se povećala pokrivenost mreže. U sustavu postoji nekoliko podatkovnih centara postavljenih uz cestu koji periodno razasijaju podatke vozilima. Vozila koja prime razasijane poruke, spremaju ih i razasijaju na raskrižju. Stoga sustav uz ceste s podatkovnim centrima koristi i raskrižja. Metoda VADD (engl. *Vehicle-Assisted Data Delivery in VANET*) [52] usvaja ideju o korištenju SCF komunikacijskog modela za isprekidanu povezanost u ad-hoc mrežama vozila. Metoda VADD pokušava predvidjeti mobilnost vozila kako bi se prosljedili paketi pomoću najbolje rute s najmanjim kašnjenjem u dostavi podataka. U metodi VADD vozila spremaju i prenose informacije te ih razasijaju na raskrižjima. Na temelju tehnike koja se koristi na raskrižjima predložena su tri protokola VADD te su vrednovana prema omjeru dostave paketa, kašnjenja podatkovnih paketa i općih troškova prometa. DPIB i VADD dokazuju da je vrlo učinkovito rasprostirati poruke na raskrižjima jer se poruke mogu neometano širiti u više smjerova te je obično najveći broj novih susjeda na raskrižjima. Cilj je predloženog algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka odabrati razasijljače na temelju njihovog položaja i rasprostirati poruke u sve četiri strane i kada vozila nisu na raskrižjima.

DV-CAST [53] je protokol razasijljanja čiji je cilj izgradnja sustava koji radi učinkovito u gustim i rijetkim područjima mreže te rješavanje oluje razasijljanja i problema mrežne nepovezanosti. DV-CAST se sastoji od tri glavne komponente: (i) detekcije susjeda, (ii)

potiskivanja razaslanja i (iii) SCF mehanizma. Mehanizam detekcije susjeda pruža informacije o lokalnom povezivanju i na temelju njih koristi potiskivanje razaslanja ili SCF mehanizam u situacijama gustog ili rijetkog prometa. DV-CAST je vrednovan samo u scenariju autocesta, no autori ga planiraju proširiti i na gradska okruženja. SRD [54] je protokol rasprostiranja informacija u ad-hoc mrežama vozila koji koristi različite strategije za guste i rijetke mreže. Koristi potiskivanje razaslanja u gustim mrežama da bi se izbjegla oluja razaslanja. U rijetkim mrežama SRD koristi SCF model komunikacije kako bi iskoristio prednost mobilnosti čvorova i rasprostirao informacije u dijelove mreže koji su geografski odvojeni. Autori su kroz simulacije dokazali da SRD ima bolje performanse od DV-CAST-a u smislu omjera dostave poruka i općih troškova mrežnog prometa. Predloženi algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka ima za cilj rješavanje istih problema u ad-hoc mrežama vozila kao SDR i DV-CAST i temelji se na istim principima.

GeoDTN+Nav [55] je hibridni protokol usmjeravanja koji kombinira geografsko usmjeravanje i DTN razaslanje. U gustim ili povezanim mrežama koristi geografsko usmjeravanje i usmjerava pakete dvama načinima: pohlepnim i opsežnim načinom usmjeravanja. Može detektirati dijeljenje mreže i poboljšati dostavu paketa prelaskom na DTN razaslanje. Početni je način pohlepno usmjeravanje u kojemu se može doseći lokalni maksimum koji uzrokuje prelazak u opsežni način usmjeravanja. U pohlepni se način može vratiti ako se pronade bliže vozilo. Kada se otkriju prekidi mreže s maksimalnim brojem skokova koji su napravljeni u opsežnom načinu usmjeravanja, prebacuje se u DTN razaslanje. Nakon pronalaska boljeg nosioca paketa, opet se vraća u pohlepni način. Autori predlažu i VNI (engl. *Virtual Navigation Interface*) sučelje koje pruža općenite informacije o ruti za izbor razaslanja u razdvojenim mrežama. Vrednovanje performansi pokazuje da GeoDTN+Nav nadmašuje tradicionalne geografske protokole u smislu omjera dostave paketa, ali ima povećano kašnjenje dostavljanja paketa.

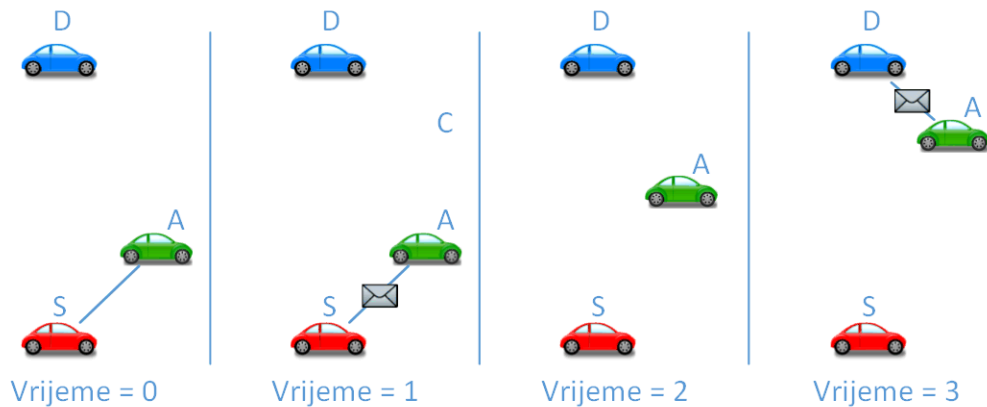
Inteligentni protokol usmjeravanja [56], sličan protokolu GeoDTN+Nav, za guste ili povezane mreže koristi isto geografsko usmjeravanje, no za DTN usmjeravanje razmatra druge korisne parametre kako bi odabrao najbolji čvor za spremanje i prijenos paketa. Genetski algoritam se koristi da bi se trenirao DTN sustav vrednovanja na čvoru i odredilo koliko je važan svaki parametar za simulacijsko okruženje. Rezultati vrednovanja performansi pokazuju da svaka nova generacija parametara dobivena s genetskim algoritmom smanjuje prosječno kašnjenje i povećava prosječni omjer dostave poruka. Korištenje genetskih algoritama za izračun parametara za algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka može dovesti do povećanja učinkovitosti i bit će razmatran u budućem radu i proširenju predloženog algoritma.

GeoSpray [57] je hibridni geografski protokol usmjeravanja koji iskorištava prednosti višestrukog kopiranja i jednostrukog kopiranja shema usmjeravanja. Prvo obavlja kontrolirano prskanje distribuirajući ograničen broj kopija paketa prema čvorovima koji idu bliže i/ili stižu ranije na odredište. Nakon toga se prebacuje na shemu razošiljanja i kombinira nekoliko kontrolnih izvora podataka kako bi donio odluku o usmjeravanju. Na kraju, da bi poboljšao korištenje resursa, briše dostavljene pakete u mrežnim čvorovima. Rezultati mjerenja performansi pokazuju da poboljšava vjerojatnost dostave i smanjuje kašnjenje dostave u usporedbi s drugim sličnim mehanizmima. GeoSpray pokazuje da kombiniranje razošiljanja i prosljeđivanja poruka može biti vrlo učinkovito i to će biti razmatrano u budućem radu i proširenju predloženog algoritma.

Navedene metode opisane ranije koriste SCF model komunikacije da bi poboljšali komunikaciju u odvojenim dijelovima mreže s rijetkim prometom, ali niti jedan sustav ne pruža rješenje za komunikaciju u geografski velikim ad-hoc mrežama vozila. Simulacije su većinom napravljene u malim geografskim područjima (nekoliko stotina metara do kilometar) s relativno malim brojem vozila (do nekoliko stotina). Da bi pokrili veća geografska područja, potrebna su nova rješenja i algoritmi koji neće povećavati kašnjenje rasprostiranja poruka, smanjivati omjer dostave i značajno povećavati opće troškove komunikacije jer vozila moraju pohraniti veći broj poruka, držati ih duže vrijeme u spremniku i prenositi ih na veće udaljenosti. U SCF modelu komunikacije algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka postižu se navedeni ciljevi s učinkovitim korištenjem kombinacije V2V i SCF modela komunikacije pomoću implementirane metode za određivanje gustoće prometa.

3.4.3. Izmjena poruka u SCF modelu komunikacije

U klasičnom SCF modelu komunikacije umjesto da vozila odmah razošiljaju primljene nove poruke, kao što je to slučaj kod klasičnog poplavljanja porukama u V2V modelu komunikacije, spremaju ih u lokalni spremnik te se izmjena spremnika poruka između susjeda pokreće samo kada vozila susretnu nove susjede. Za raspoznavanje starih i novih susjeda svako vozilo ima listu trenutnih susjeda. Kao što je prikazano na slici 3.28 u vremenu 1 vozilo *S* pošalje poruku vozilu *A* koje ju pohranjuje u lokalni spremnik poruka. Nakon toga u vremenu 2 vozilo *A* putuje sjeverno i u vremenu 3 ulazi u komunikacijski domet vozila *D*. Nakon što vozilo *D* primijeti prisutnost vozila *A* (ili obrnuto), pokreće se izmjena spremnika poruka između vozila [15].



Slika 3.28. Način izmjene poruka u SCF modelu komunikacije [15]

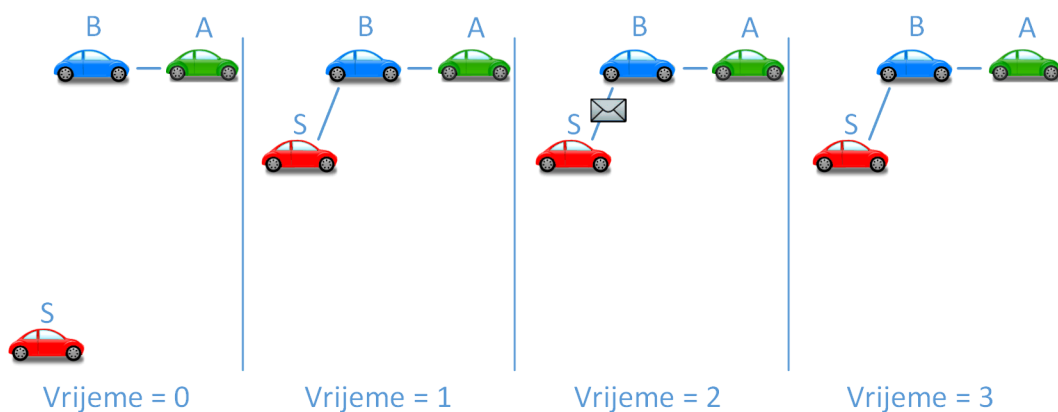
Protokol izmjene poruka između vozila sastoji se od četiri koraka. Pretpostavimo da vozilo A otkrije vozilo B. Vozilo A će prvo zatražiti izmjenu poruka s vozilom B i poslat će mu ID-jeve poruka koji se nalaze u njegovom spremniku. U drugom koraku vozilo B odgovara i šalje sve poruke koje vozilo A nema u svom spremniku. Vozilo B će poslati zahtjev vozilu A s ID-jevima poruka koje vozilo A ima, a on nema. U zadnjem koraku vozilo A će poslati tražene poruke vozilu B. U sljedećem primjeru su prikazani opisani koraci ($Poruke_A = \{x, y\}$ i $Poruke_B = \{y, z\}$):

- | | | |
|------|-----------------------------------|---|
| 0. | $B \rightarrow A \{Beacon\}$ | B razaslija redovnu <i>beacon</i> poruku koju primi vozilo A. Vozilo A prepoznaje da je to novi susjed i započinje prvi korak izmjene poruka s vozilom B. |
| i. | $A \rightarrow B: \{ID_x, ID_y\}$ | A pošalje ID-jeve poruka iz svog spremnika. Trenutno ima spremljene poruke x i y |
| ii. | $B \rightarrow A: \{z\}$ | B pregledava vlastiti spremnik i šalje sve poruke koji vozilo A nema. U ovom je slučaju to poruka z. |
| iii. | $B \rightarrow A: \{ID_x\}$ | B zahtijeva od vozila A poruke koje on nema, a vozilo A ima. To zna iz koraka 1 u kojemu je vozilo A poslalo ID-jeve svojih poruka. U ovom slučaju vozilo B zahtijeva poruku x. |
| iv. | $A \rightarrow B: \{x\}$ | A odgovara vozilu B i šalje mu traženu poruku x. |

Nakon završetka zadnjeg koraka izmjene poruka oba vozila imaju uniju njihovih poruka $\{x, y, z\}$. Korak (ii) i korak (iii) se mogu spojiti u jedan korak da bi se poboljšala učinkovitost ovog modela komunikacije. Obje se informacije, slanje poruka koje drugo vozilo nema i slanje zahtjeva za porukama, mogu spojiti u jednu poruku. U slučaju da u koraku (i) vozilo B primijeti

da oba vozila posjeduju iste poruke, postupak izmjene poruka se neće nastaviti. Postupak izmjene poruka se može prekinuti i u trećem koraku ukoliko je zahtjev vozila *B* za porukama od vozila *A* prazan.

Tijekom implementacije pojavio se problem koji je nazvan problem „starih susjeda“. Kao što je opisano u [15] nakon što dva vozila postanu susjedi i završi se postupak izmjene poruka, između njih se više ne ponavlja. Kao što je prikazano na slici 3.29 vozila *A* i *B* su susjedi koji su već izmijenili sadržaje svojih spremnika. Kada u vremenu 1 vozilo *S* postane novi susjed s vozilom *B*, ali ne i vozilom *A* jer nisu u komunikacijskom dometu, u vremenu 2 će vozila *S* i *B* provesti postupak izmjene spremnika. Iako će u vremenu 3 vozilo *B* imati nove poruke, neće ih poslati vozilu *A* jer su „stari susjedi“. Rješenje ovog problema je razmjenjivanje ID-jeva iz spremnika poruka između „starih susjeda“ pomoću *beacon* poruke periodno ili nakon svakog spajanja s novim susjedom.



Slika 3.29. Problem „starih susjeda“

3.4.4. Metode za upravljanje lokalnim spremnikom poruka

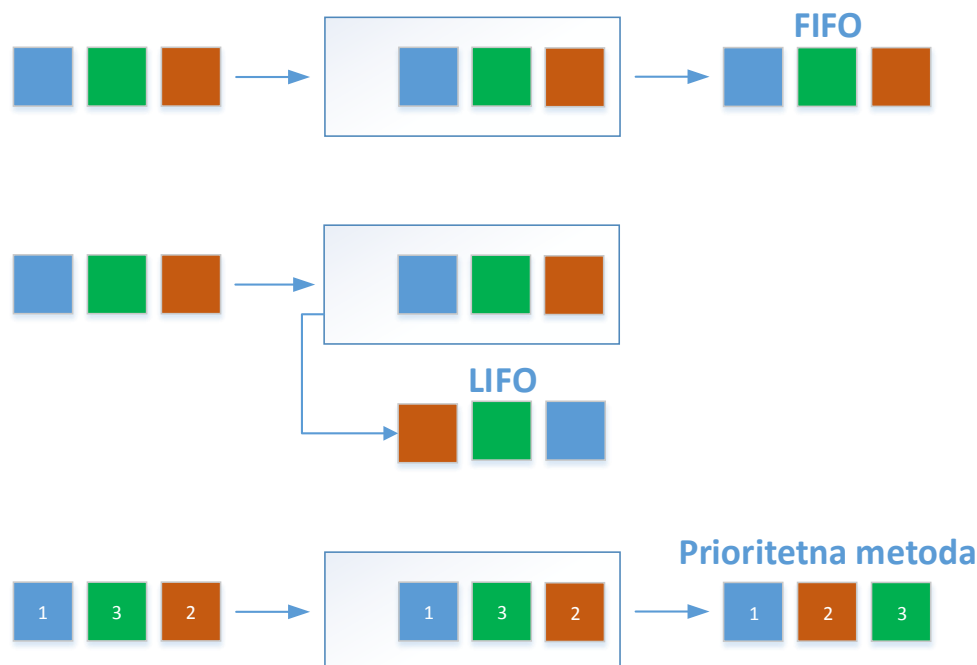
Budući da je u stvarnim sustavim veličina spremnika ograničena, nepotrebne i stare poruke potrebno je obrisati kako bi bilo dovoljno mjesta za nove. Mogu se koristiti različiti mehanizmi za upravljanje spremnikom podataka i za odlučivanje o tome koje poruke treba obrisati. Klasične metode koja se mogu koristiti su (slika 3.30):

- FIFO (engl. *First In, First Out*) u kojoj će prvo biti obrisane najstarije poruke u spremniku. Ova metoda je pogodna za jednostavno upravljanje spremnikom poruka i koristi se u predloženom algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka.
- LIFO (engl. *Last In, First Out*) u kojoj će prvo biti obrisana najnovija poruka u spremniku. Ova metoda nije pogodna za korištenje u ad-hoc mrežama vozila jer se u

velikoj većini slučajeva žele zamijeniti stare poruke s novima jer su nove najčešće važnije.

- Prioritetna metoda na temelju prioriteta briše poruke prema dodijeljenom prioritetu. U ovoj metodi je potrebno dodjeljivati prioritete porukama pažljivo jer poruke višeg prioriteta imaju bolje performanse, ali to može negativno utjecati na performanse cijelog sustava. Potrebno je voditi računa o rangu prioriteta te da se koriste svi prioriteti kako bi ova metoda imala smisla.

Ostale metoda upravljanja spremnikom mogu biti npr. brisanje poruka prema vremenu njihovog slanja, prema udaljenosti od izvorišta, prema kontekstu poruke ili prema iskazanim interesima vozila. Ove metode se najčešće kombiniraju s nekom od gore navedenih metoda.

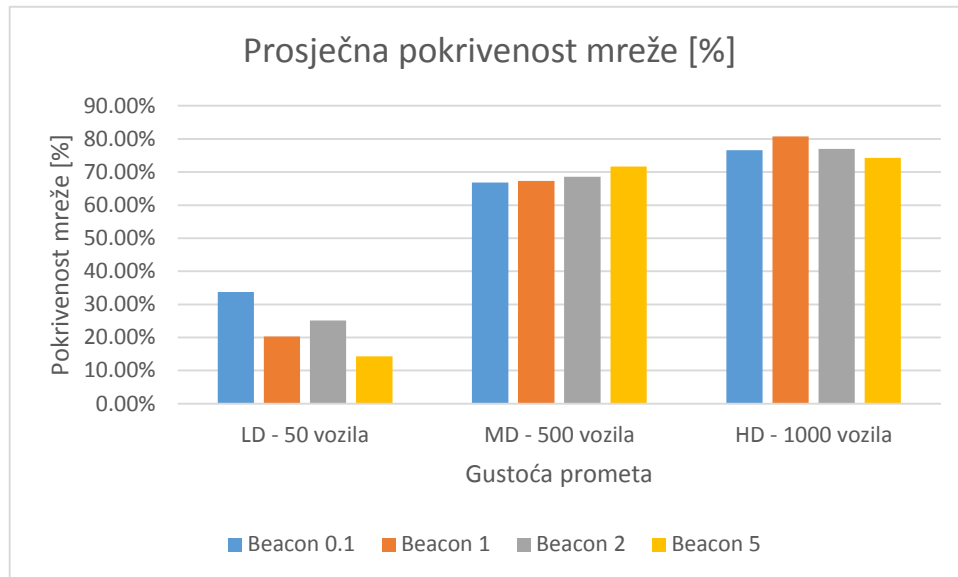


Slika 3.30. Klasične metode za upravljanje spremnicima podataka

3.4.5. Određivanje *beacon* intervala za SCF model komunikacije

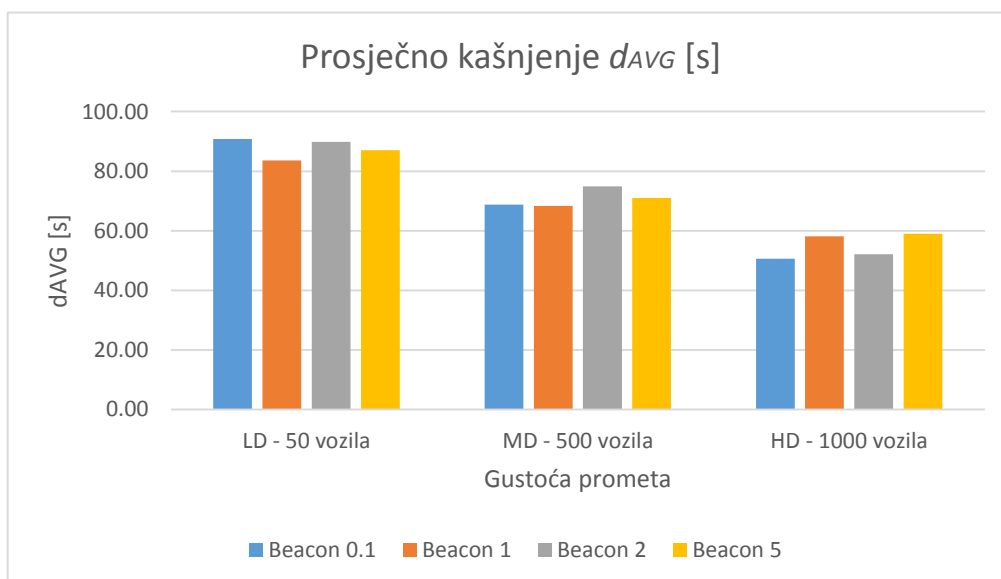
Provedene su simulacije za klasični SCF model komunikacije za četiri različita perioda slanja *beacon* poruka, tj. 0.1 s, 1 s, 2 s i 5 s, te su korištene okoline i simulacijske postavke kao što je prikazano u tablici 3.1. Na temelju rezultata vrednovane su performanse te je odabran najpogodniji *beacon* interval za korištenje u ovom modelu komunikacije. Na slici 3.31 prikazani su rezultati usporedbe prosječne pokrivenosti mreže porukama za sva četiri testirana *beacon* intervala slanja poruka. U usporedbi s istim mjerenjima u V2V modelu komunikacije pokrivenost mreže s ovim modelom je značajno veća, a uzrok tomu je prenošenje poruka do

dijelova koji nisu trenutno spojeni. Za sve tri gustoće vozila dobiveni su različiti rezultati. Gustoća vozila LD ima najveću pokrivenost u *beacon* intervalu od 0.1 s, gustoća MD u *beacon* intervalu od 5 s, a gustoća HD u *beacon* intervalu od 1 s. *Beacon* interval od 2 s u sva tri mjerenja je odmah iza najvećih vrijednosti.



Slika 3.31. Prosječna pokrivenost mreže porukama za SCF model komunikacije

Na slici 3.32 prikazano je prosječno kašnjenje po poruci u mreži za sva četiri testirana *beacon* intervala slanja poruka.



Slika 3.32. Prosječno kašnjenje po poruci u mreži za SCF model komunikacije

U usporedbi s istim mjerenjem u V2V modelu komunikacije u SCF komunikacijskom modelu kašnjenje je značajno veće i obrnuto proporcionalno, tj. s povećanjem gustoće prometa smanjuje se dok je u V2V komunikacijskom modelu obrnuto. Razlog tomu je što u SCF modelu komunikacije s porastom broja vozila u mreži vozila ne moraju daleko prenositi poruke jer je mreža dobro pokrivena te će poruke u jednom skoku biti proslijeđene većem broju susjeda. Na slici 3.32 može se vidjeti da niti jedan *beacon* interval nema najmanja kašnjenja u svim gustoćama prometa. Najmanje kašnjenje za gustoću prometa LD pokazuje *beacon* interval od 1 s, za MD gustoću prometa *beacon* intervali od 0.1 s i 1 s, a za gustoću HD *beacon* intervali od 0.1 s i 2 s.

Najveća prijeđena udaljenost poruke kroz vrijeme simulacije u SCF komunikacijskom modelu prikazana je u tablicama 3.3, 3.4 i 3.5. Ukupno vrijeme simulacije od 300 s podijeljeno je u devet vremenskih intervala (perioda) i prikazana je najveća udaljenost na kraju svakog vremenskog intervala. Ti vremenski intervali prikazani su na vremenskom pravcu na slici 3.33.



Slika 3.33. Vremenski intervali za mjerenje najveće prijeđene udaljenosti poruka

U tablici 3.3 za gustoću vozila LD najviše se maksimuma postiže kada je *beacon* interval 2 s te su najveće prijeđene udaljenosti puno veće u odnosu na ostale *beacon* intervale. U *beacon* intervalima od 1 s i 5 s u istim periodima poruke su prešle puno manju udaljenost, a *beacon* interval od 0.1 s ima najmanju razliku u odnosu na *beacon* interval od 2 s i u trima periodima pokazuje bolje rezultate.

Tablica 3.3. Najveća prijeđena udaljenost poruke u vremenu za LD gustoću vozila [m]

	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6	Period 7	Period 8	Period 9
Beacon 0.1s	509.37	874.75	1016.18	1016.18	1691.18	2110.34	3139.53	3450.80	3450.80
Beacon 1s	538.46	644.55	644.55	948.35	1001.11	1650.86	2780.12	2894.13	2894.13
Beacon 2s	510.24	1003.31	1003.31	1474.29	1474.29	2181.79	2663.77	3677.13	3677.13
Beacon 5s	478.85	478.85	478.85	807.57	1145.24	1145.24	1923.17	2816.34	3056.05

U tablici 3.4 za gustoću vozila MD najveće udaljenosti se postižu za *beacon* intervale od 0.1 s i 2 s. *Beacon* interval od 5 s pokazuje najlošije rezultate, a *beacon* interval od 1 s ima u dvama periodima najbolje rezultate, no u drugim periodima zaostaje.

Tablica 3.4. Najveća prijeđena udaljenost poruke u vremenu za MD gustoću vozila [m]

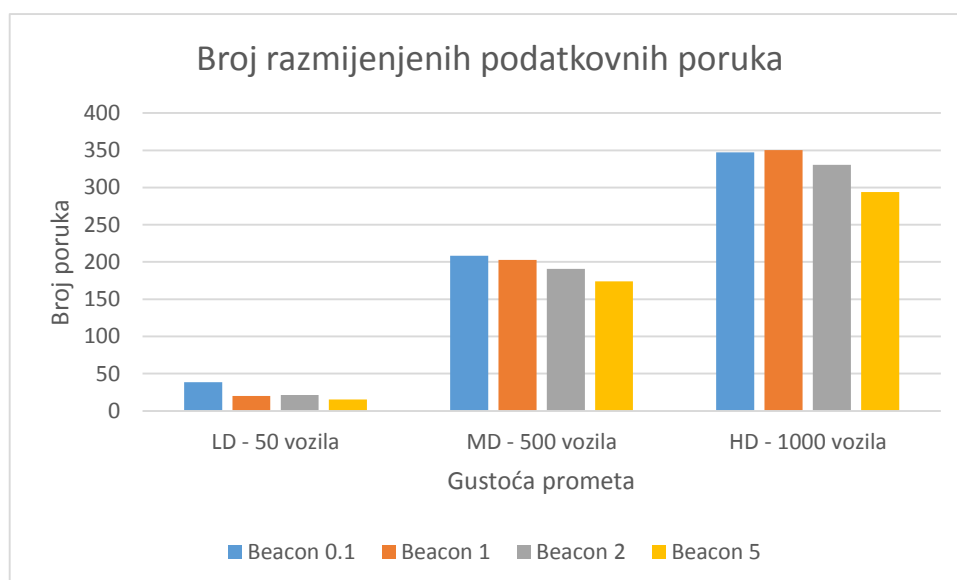
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6	Period 7	Period 8	Period 9
Beacon 0.1s	1444.71	1510.55	1708.08	2301.00	3614.68	4656.85	5934.95	6578.68	7723.68
Beacon 1s	1380.20	1380.20	1777.04	2509.63	3244.65	4566.50	6714.54	7579.86	7820.26
Beacon 2s	1177.76	1249.46	2131.22	2476.20	3218.09	4383.82	6025.09	7797.91	8024.49
Beacon 5s	1269.86	1389.78	1768.15	2121.44	3347.25	4671.73	6166.77	7298.40	7727.04

U tablici 3.5 za gustoću vozila HD najveće udaljenosti se postižu za *beacon* interval od 2 s u prvih sedam perioda, osim u periodima dva i tri gdje su najveće prijeđene udaljenosti poruka za *beacon* interval od 5 s. U periodu osam *beacon* interval od 0.1 s ima nešto bolje rezultate u odnosu na ostale intervale, a u periodu devet pokazuje značajno bolje rezultate.

Tablica 3.5. Najveća prijeđena udaljenost poruke u vremenu za HD gustoću vozila [m]

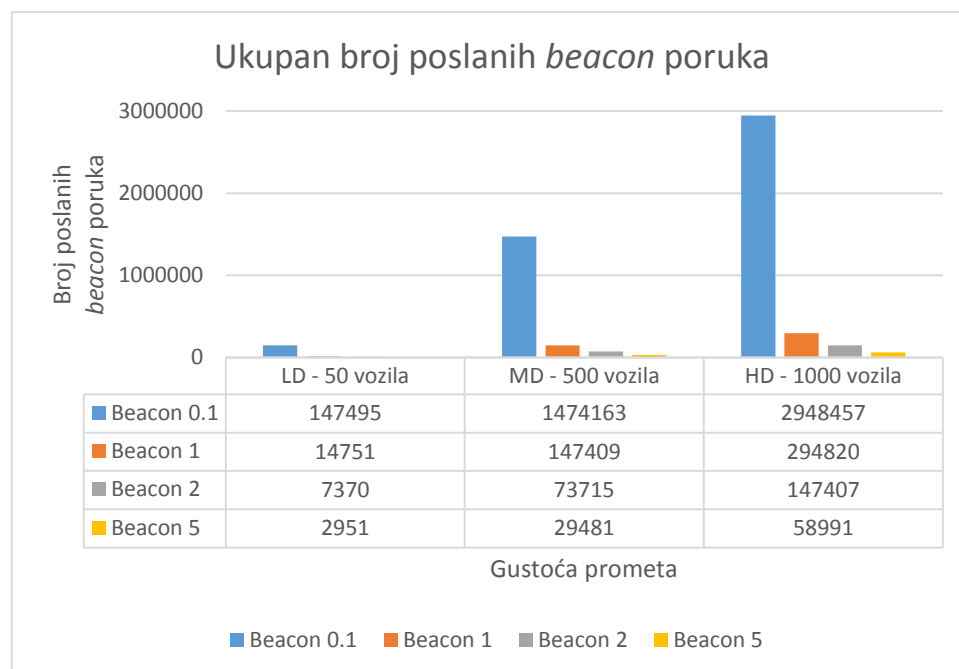
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6	Period 7	Period 8	Period 9
Beacon 0.1s	1491.84	1797.89	2419.79	3068.92	4779.21	6043.74	7099.95	8180.73	8791.18
Beacon 1s	1413.54	1657.32	2363.19	3464.27	4536.04	6105.81	7327.71	8030.83	8254.71
Beacon 2s	1571.66	1785.56	2435.24	3653.07	5038.36	6901.09	7786.81	8160.68	8312.55
Beacon 5s	1421.15	2024.16	2814.74	3320.34	4131.88	5880.95	6786.81	7705.92	7705.95

Na slici 3.34 prikazani su rezultati mjerenja prosječnog broja podatkovnih poruka razmijenjenih po svakom vozilu za tri gustoće prometa (LD, MD, HD).



Slika 3.34. Ukupan broj razmijenjenih poruka po vozilu za SCF model komunikacije

Sve tri gustoće prometa imaju najveći broj razmijenjenih podatkovnih poruka kada je *beacon* interval manji jer tada vozila češće susreću nove susjede i započinju s njima postupak razmjene poruka. Budući da je cilj algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka smanjiti broj razmijenjenih podatkovnih poruka u mreži, preporučuje se upotreba većeg *beacon* intervala. Ukupan broj poslanih *beacon* poruka je gotovo identičan kao i u V2V modelu komunikacije što je logično jer su korišteni isti intervali u istoj okolini i scenariju (slika 3.35). Kao i za V2V model komunikacije značajno je veći broj *beacon* poruka poslanih u *beacon* intervalu od 0.1 s u odnosu na druge intervale što može značajno opteretiti mrežu i smanjiti propusnost. Ovakvo mali period *beacon* intervala od samo 0.1 s nije pogodan za korištenje jer unosi dodatno opterećenje za mrežu bez značajnog poboljšanja ostalih performansi.



Slika 3.35. Ukupan broj poslanih *beacon* poruka za različite *beacon* intervale u SCF modelu komunikacije

Simulacijski rezultati pokazuju da je u jednostavnom SCF modelu komunikacije u postavljenom simulacijskom okruženju optimalno korištenje *beacon* intervala od 2 s jer daje najbolji omjer performansi i troškova slanja *beacon* poruka. S obzirom da je jedan od glavnih ciljeva SCF modela komunikacije povećanje pokrivenosti mreže porukama i što dalje rasprostiranje poruke od izvora, rezultati mjerenja performansi ukazuju da je za navedene ciljeve najpogodnije koristiti *beacon* interval od 2 s. Iako u nekim mjerenjima *beacon* interval od 0.1 s pokazuje najbolje performanse u odnosu na ostale *beacon* intervale, zbog ogromnog broja poslanih *beacon* poruka unosi se dodatno i nepotrebno opterećenje za mrežu koje ne daje

bolje performanse te se ne bi trebao upotrebljavati. Ostala dva *beacon* intervala od 1 s i 5 s nisu se pokazala pogodnim za korištenje u ovom modelu komunikacije.

3.5. Određivanje gustoće prometa u ad-hoc mrežama vozila

U situacijama kada se gustoća prometa smanji i kada V2V model komunikacije nije više učinkovit i ne može pokriti cijelo ili veće područje mreže, dolazi do prebacivanja na SCF model komunikacije. Da bi se SCF model komunikacije učinkovito integrirao s V2V modelom komunikacije, potrebno je definirati način izračuna gustoće prometa u okolini vozila i granicu za gustoću na kojoj se mijenja komunikacijski model.

3.5.1. Pregled literature za određivanje gustoće u ad-hoc mrežama vozila

U [58] autori koriste gustoću prometa kako bi kontrolirali komunikacijski domet vozila. Dinamički komunikacijski domet pomaže održavati povezanost i smanjuje negativni efekt visoke prijenosne snage. Problemi velike gustoće prometa, poput oluje razošiljanja, mogu se rješavati kontroliranjem komunikacijskog dometa. U radu je predložena shema određivanja lokalne gustoće vozila korištenjem samo uzorka kretanja vozila bez izmjene poruka između vozila. Na taj način vozila mogu razlikovati rijetku i gustu prometnu okolinu te prema okolini mijenjati vlastiti komunikacijski domet. U predloženom algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka vozila također razlikuju gustu i rijetku prometnu okolinu, ali prema okolini mijenjaju model komunikacije, a ne komunikacijski domet.

U [59] autori pokušavaju slično kao u [58] riješiti problem oluje razošiljanja kontroliranjem komunikacijskog dometa vozila. Ističu da iako povećavanje komunikacijskog dometa pomaže porukama da dođu do odredišta u manjem broju skokova, ako se sva vozila ponašaju „pohlepno“ i povećavaju svoj komunikacijski domet, nastat će previše sukoba u komunikaciji što može dovesti do pucanja bežičnih kanala. S druge strane, kratki komunikacijski domet uzrokuje veći broj skokova i povećava kašnjenja, ali smanjuje interferenciju prometa. Mjerenje gustoće prometa vrši se brojanjem neposrednih 1-skok susjeda i na temelju te informacije izračunava se najveći komunikacijski domet vozila. U predloženom algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka u mjerenje gustoće prometa uz broj 1-skok uključen je i broj 2-skok susjeda jer daje bolju procjenu gustoće okoline u kojoj se nalazi vozilo.

U [60] autori mjere gustoću vozila kao način procjene prometnih uvjeta na cesti. Predlažu metodu bez infrastrukture (engl. *infrastructure-less method*) za određivanje gustoće vozila. U radu pokazuju da je lokalna gustoća najbolja za određivanje globalne gustoće vozila ako je

razmak između vozila eksponencijalno raspodijeljen. Također, pokazano je da je u rijetkim mrežama s malom gustoćom prometa princip određivanja gustoće na temelju susjeda nepouzdan, no točnost se povećava s povećanjem gustoće mreže. Zaključuju da se s uključivanjem informacija o broju 2-skoka i 3-skoka susjeda povećava točnost određivanja gustoće. Stoga su u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka u mjerenje gustoće prometa uključeni podaci o 2-skoku susjedima. U budućem radu bi trebalo proširiti preloženi algoritam i uključiti podatke o 3-skoku susjedima u izračun gustoće prometa te provesti simulacije kako bi se ispitala korisnost tih podataka.

U [61] autori vrednuju četiri postojeća protokola razašiljanja s višestrukim skokovima u smislu skalabilnosti uzimajući u obzir gustoću u ad-hoc mreži vozila. Testirani protokoli koriste različite pristupe za odabir razašiljača: StochLocal i Distance koriste broj 1-skoka susjeda kako bi izračunali prag ponovnog slanja, Multi-Point prenošenje (MPR) koristi 2-skoku mrežnu topologiju za odabir razašiljača, a poboljšani prilagodljivi Gossiping (AAG) također koristi 2-skoku mrežnu topologiju i lokalnu generiranu slučajnu varijablu za razašiljanje. Njihovi rezultati simulacije pokazuju da su protokoli StochLocal i Distance visoko skalabilni prema gustoći prometa dok MPR, a posebno AAG, imaju smanjivanje efekta razašiljanja s porastom gustoće čvorova. Simulacijski rezultati u [61] ne idu u prilog korištenju broja 2-skoka susjeda za izračun gustoće prometa i stoga je potrebno provesti simulacije kako bi se utvrdila korisnost korištenja informacije o 2-skoku susjedima.

3.5.2. Definiranje metode za izračun gustoće prometa u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka

Za definiranje mehanizma mjerenja gustoće prometa u obzir se uzimaju sljedeća dva kriterija koja moraju biti zadovoljena da bi izračun gustoće vozila bio što stvarniji i pouzdaniji [62]:

- točnost: točnost mehanizma mjerenja gustoće definira se kao dosljednost lokalnog mjerenja gustoće s globalnom gustoćom mreže. Na primjer, ako se vozilo nalazi u gustom dijelu mreže općenito, ali je trenutno smješteno u susjedstvu s rijetkim prometom koje se nalazi unutar tog gustog dijela mreže, mehanizam mjerenja gustoće mora detektirati okolinu kao okolinu s gustim prometom. Vrednovanje određivanja gustoće vozila temeljeno na broju susjeda pokazuje da prikupljanjem dodatnih informacija o broju susjeda od vozila koja su relativno na višim razinama povećava točnost mjerenja gustoće [60]. To znači da uključivanje broja 2-skoka susjeda u mjerenje

i računanje gustoće prometa daje bolju točnost u usporedbi s brojanjem samo 1-skok susjeda.

- fluktuacija: definira se kao količina uspona i padova u vrijednosti mjerene gustoće. Velika fluktuacija može uzrokovati često mijenjanje vlastite percepcije gustoće vozila što znači da će imati vrlo česte promjene između gustog i rijetkog prometa i prečesto će mijenjati modele komunikacije između V2V i SCF. Posljedica toga je neučinkovita primjena obaju modela komunikacije. Na primjer, ako se vozilo nalazi u rijetkom dijelu mreže i koristi SCF komunikacijski model, može susresti manje zagušenje prometa na cesti poput crvenog svjetla na semaforu. Ako u mjerenju gustoće ima veliku fluktuaciju, vozilo će promijeniti model komunikacije iz SCF u V2V i prestat će spremati primljene poruke, ali će odmah nakon semafora opet biti u okolini s rijetkim prometom i poruke koje je primio na raskrižju biti će izgubljene.

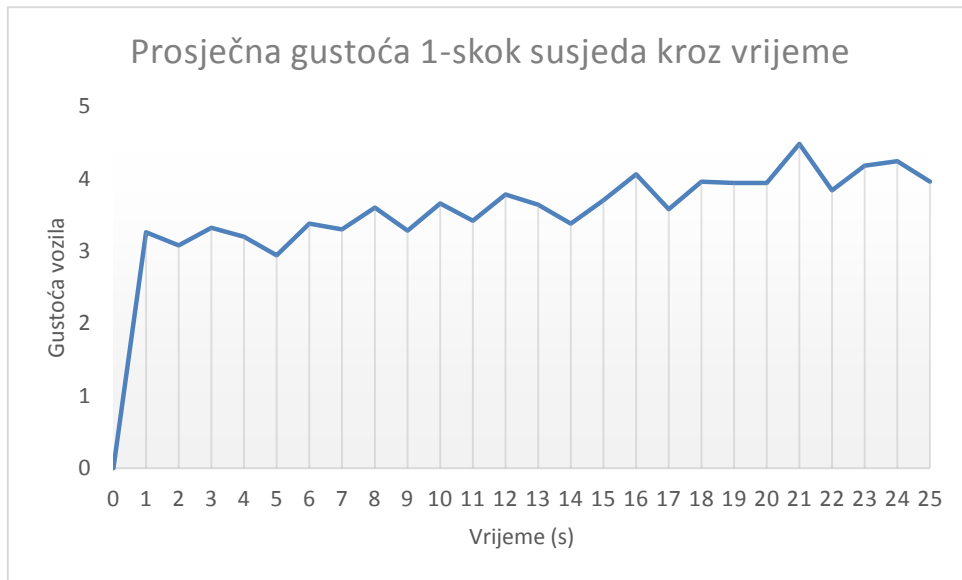
U ovom poglavlju uspoređena su dva mehanizma koja se koriste u MANET i ad-hoc mrežama vozila kako bi se ispitala njihova prikladnost za korištenje u algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka. Ti mehanizmi su:

- mjerenje gustoće pomoću 1-skok susjeda gdje se gleda broj susjeda s kojima vozilo može izravno komunicirati
- mjerenje gustoće pomoću 2-skok susjeda gdje se gleda broj susjeda s kojima vozilo nema izravnu komunikaciju, a s kojima svi 1-skok susjedi izvornog vozila imaju izravnu komunikaciju.

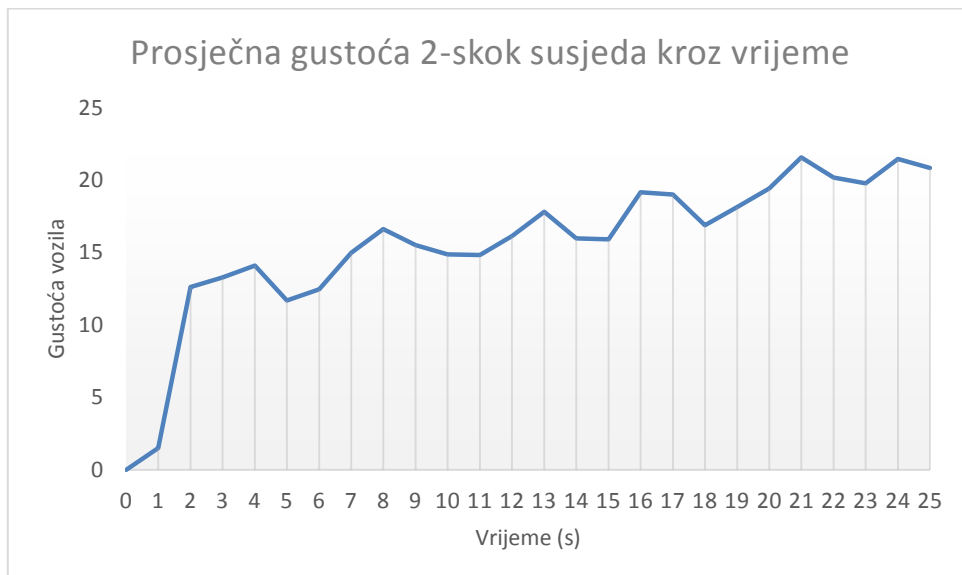
Tablica 3.6. Simulacijske postavke za mjerenje gustoće prometa

Simulacijsko okruženje	MiXiM 2.2
Mrežni simulator	Omnet++ 4.3.1.
Scenarij	Gradsko i prigradsko područje
Dimenzije karte	10x15 km
Komunikacijski standardi	IEEE 802.11p IEEE 1609.4 DSRC/WAVE
Komunikacijski spektar	5.9 GHz (5.85-5.925 GHz)
Maksimalni komunikacijski domet	1000 m
Gustoća prometa	50, 75, 100, 125 vozila
Trajanje simulacije	60 s
Brzina vozila	20 m/s
Interval <i>beacon</i> poruke	2 s

Iako mjerenja u [60] pokazuju da uključivanje broja 2-skok susjeda u mjerenje i računanje gustoće prometa donosi bolju točnost u usporedbi s brojanjem samo 1-skok susjeda, nisu uspoređene te dvije metode na temelju fluktuacije u njihovim mjerenjima. Stoga su korištenjem simulacije provedena mjerenja i usporedba performansi te dvije metode. Simulacije su provedene sa simulacijskim postavkama prikazanim u tablici 3.6. Slike 3.36 i 3.37 pokazuju prosječnu gustoću za sva vozila u simulaciji za 1-skok i 2-skok metode odvojeno.



Slika 3.36. Fluktuacija prosječne gustoće 1-skok susjeda kroz vrijeme

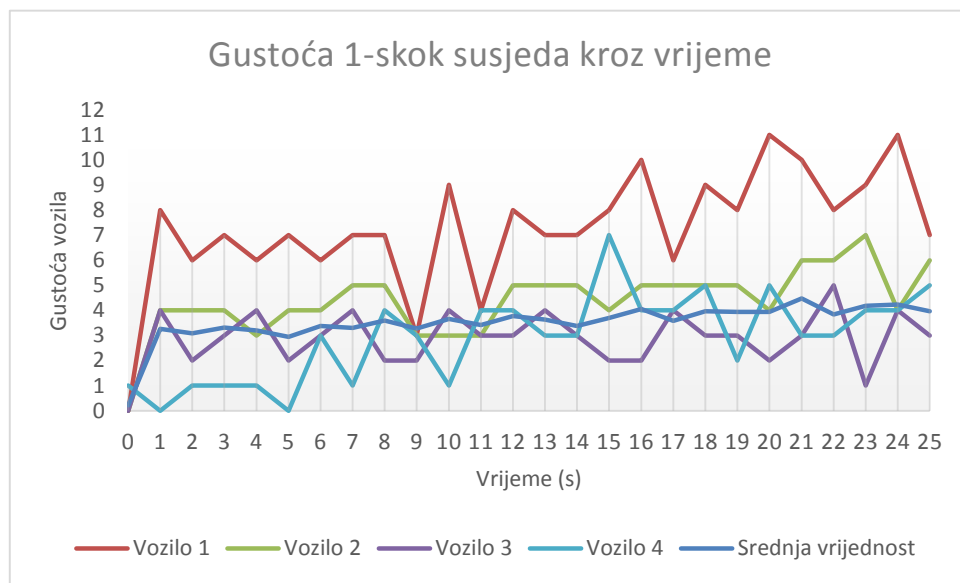


Slika 3.37. Fluktuacija prosječne gustoće 2-skok susjeda kroz vrijeme

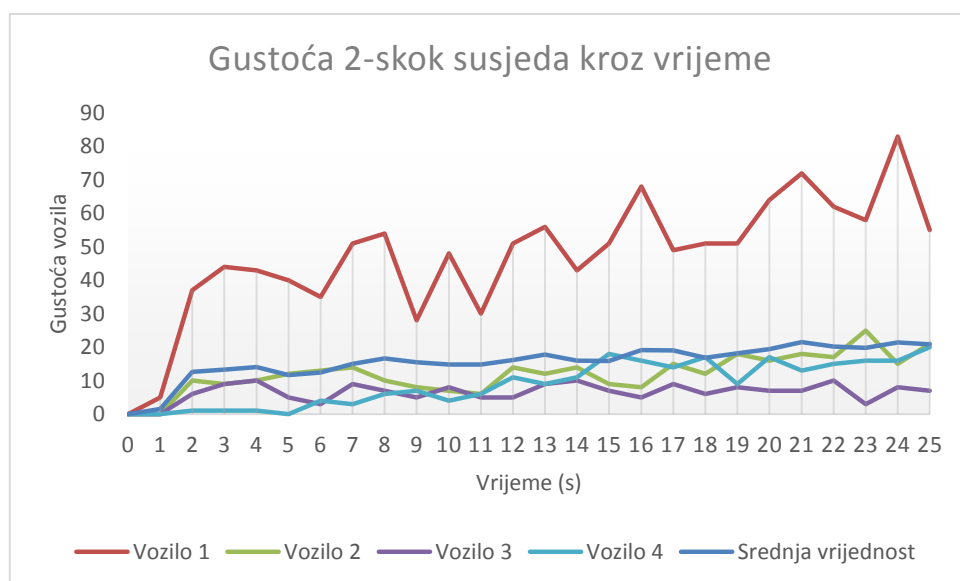
Za brojanje vozila u 1-skok susjedstvu svako vozilo šalje *beacon* poruku svake 2 s. Susjedni čvorovi koji prime *beacon* poruku broje pošiljatelja kao 1-skok susjed. U svakoj se *beacon*

poruci također šalje i broj 1-skok susjeda koje pošiljatelj ima. Zbroj se svih vrijednosti 1-skok susjeda na nekom čvoru koristi kao broj 2-skok susjeda tog čvora. U prvoj se simulaciji koristi 50 vozila i mjeri se broj 1-skok i 2-skok susjeda koji ima svako vozilo u svakoj sekundi simulacije. Za svaku se sekundu računa prosjek izračunatih gustoća za svako vozilo.

Da bi se prikazala fluktuacija gustoće na individualnim vozilima, izabrana su četiri slučajna vozila i prikazana je njihova promjena gustoće kroz vrijeme. Slika 3.38 prikazuje prosječnu promjenu 1-skok gustoće kroz vrijeme za četiri slučajno odabrana vozila, a slika 3.39 prosječnu promjenu 2-skok gustoće kroz vrijeme za ista četiri slučajno odabrana vozila.



Slika 3.38. Promjena prosječne 1-skok gustoće kroz vrijeme za četiri slučajna vozila

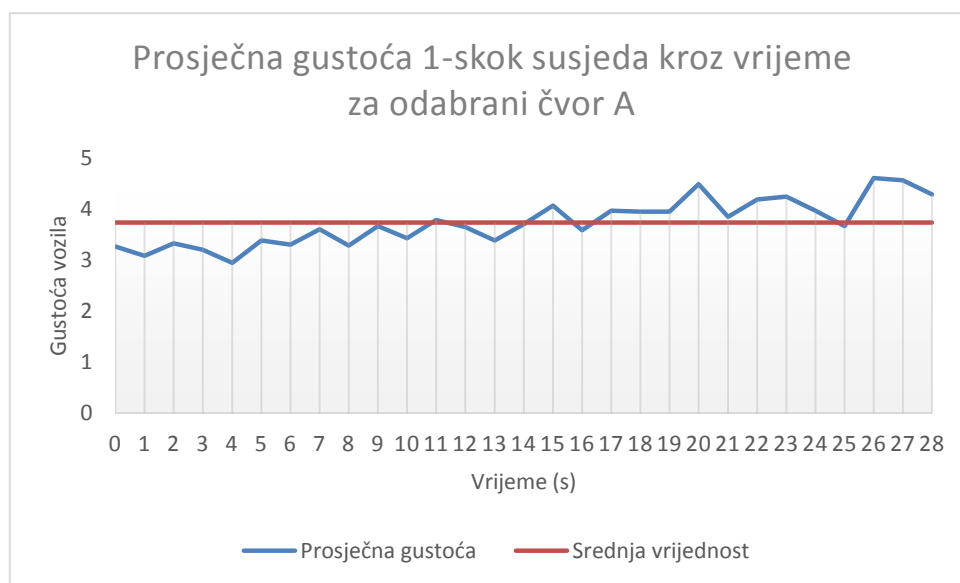


Slika 3.39. Promjena prosječne 2-skok gustoće kroz vrijeme za četiri slučajna vozila

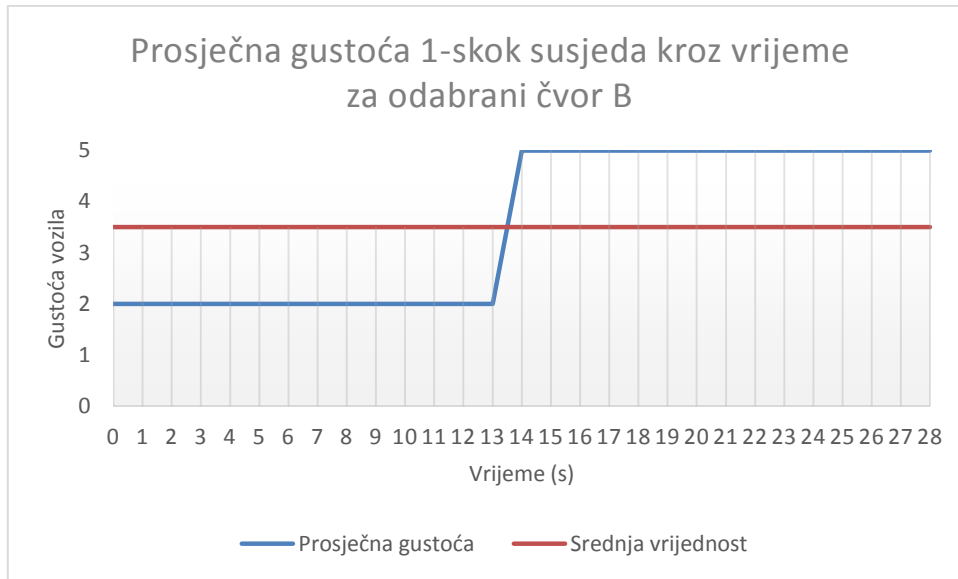
Za mjerenje fluktuacije gustoće potrebno je definirati metodu mjerenja. Najčešća metoda u statistici za mjerenje raspšenja rezultata oko aritmetičke sredine je izračun varijance. Varijanca je sredina kvadrata odstupanja individualne vrijednosti od sredine kao što je prikazano u izrazu (3-11) [63]:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (3-11)$$

Na grafu prosječne gustoće 1-skoka susjeda kroz vrijeme za odabrani čvor A na slici 3.40 prikazano je da iako je vrijednost varijance mala, vrijednost fluktuacije je velika te se promjena komunikacijskog modela mora često izvršavati što narušava učinkovitost predloženog algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka i performanse cijele mreže. Zbog toga, može se zaključiti da računanje varijance nije najbolja metoda za mjerenje fluktuacije gustoće prometa pojedinog čvora. Na grafu prosječne gustoće 1-skoka susjeda kroz vrijeme za odabrani čvor B koji je prikazan na slici 3.41 vidljivo je da iako je vrijednost varijance velika, a vrijednost fluktuacije mala promjena komunikacijskog modela će se dogoditi samo jednom u trajanju simulacije što povećava učinkovitost upotrebe V2V i SCF komunikacijskih modela jer nema česte promjene. To dokazuje pretpostavku da je potreban drugačiji način mjerenja fluktuacije gustoće prometa koji će realnije prikazati okolinu pojedinog čvora.



Slika 3.40. Prosječna gustoća 1-skoka susjeda kroz vrijeme za odabrani čvor A



Slika 3.41. Prosječna gustoća 1-skok susjeda kroz vrijeme za odabrani čvor B

Zbog toga je promijenjen način računanja fluktuacije i računa se kao razlika između vremenski uzastopnih parova gustoće prometa i te se vrijednosti zbrajaju. Fluktuacija se može definirati kao zbroj razlika između dvije uzastopne vrijednosti gustoće prema izrazu (3-12):

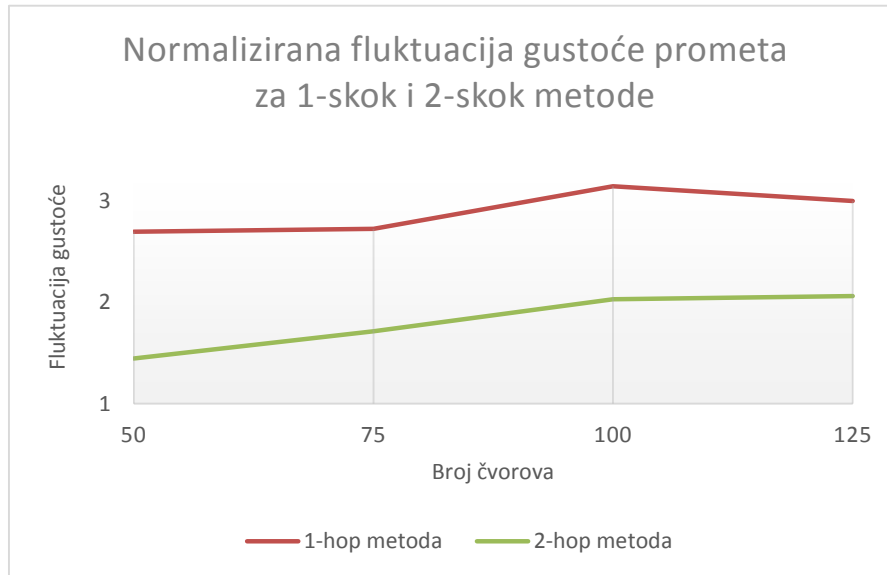
$$F = \sum_{i=2}^n (|\rho_i - \rho_{i-1}|) \quad (3-12)$$

Za usporedbu fluktuacije 1-skok i 2-skok metoda koje imaju različit raspon vrijednosti gustoće izračunata fluktuacija je normalizirana tako da je podijeljena s maksimalnom izmjerenom vrijednosti gustoće prometa u simulaciji. Normalizirana fluktuacija prikazana je u izrazu (3-13):

$$F_N = \frac{\sum_{i=2}^n (|\rho_i - \rho_{i-1}|)}{\text{Max}(\rho_i)} \quad (3-13)$$

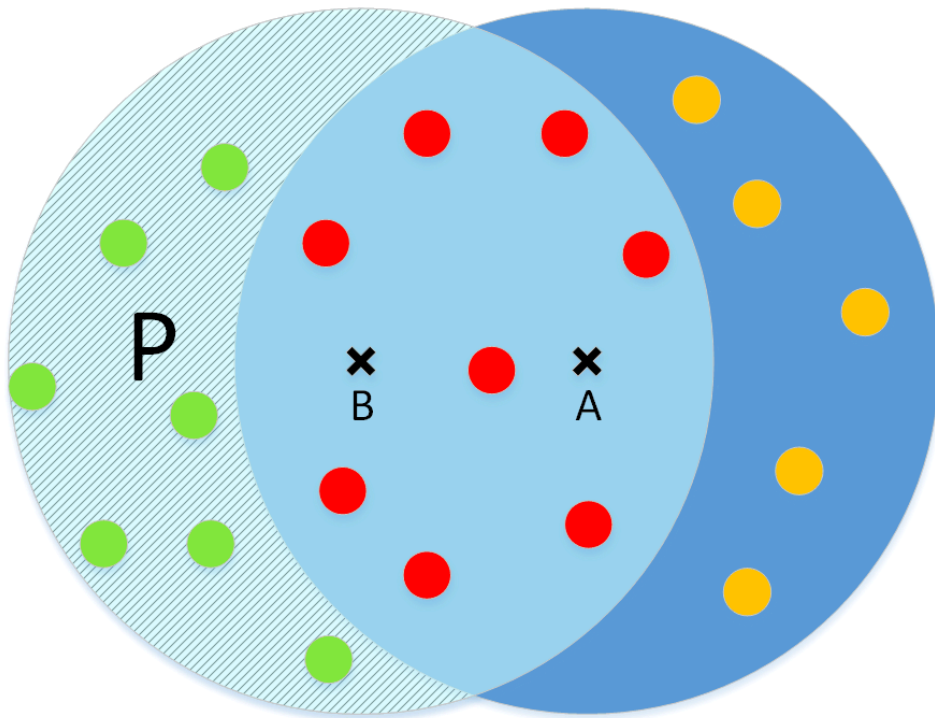
Korištenjem normaliziranog izraza za fluktuaciju, mjerena je fluktuacija za 1-skok i 2-skok metode u simulacijama s četiri različite gustoće vozila: 50, 75, 100 i 125 vozila te je izračunata fluktuacija prosječne gustoće prometa. Slika 3.42 pokazuje razliku u fluktuaciji između 1-skok i 2-skok metode. Može se zaključiti da je 2-skok metoda preciznija te osigurava manju fluktuaciju u odnosu na 1-skok metodu. Osim toga 2-skok metoda ne unosi dodatne troškove u mrežu jer se broj 2-skok susjeda šalje zajedno s *beacon* porukom i nema potrebe za slanjem

dodatnih poruka. U mjerenjima u ukupnom broju 2-skok susjeda uključen je i broj 1-skok susjeda i stoga 2-skok metoda računa zbroj 1-skok i 2-skok susjeda pojedinog vozila što daje bolji uvid u lokalnu gustoću pojedinog vozila.



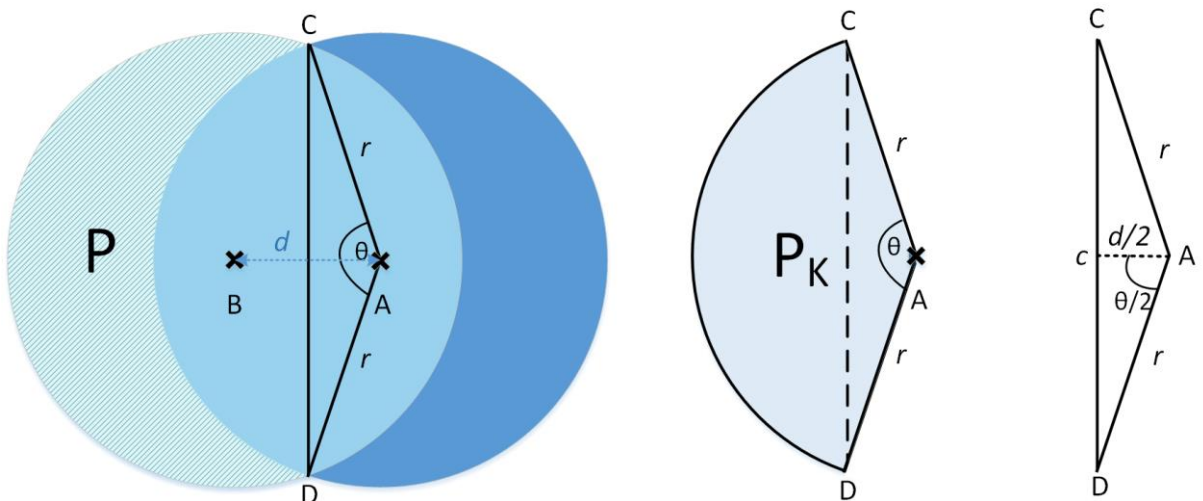
Slika 3.42. Normalizirana fluktuacija gustoće za 1-skok i 2-skok metode

Iako slanje broja 2-skok susjeda ne unosi dodatne troškove u mrežu jer se samo njihov ukupan broj za pojedino vozilo šalje u *beacon* poruci, ipak taj broj uključuje i zajedničke susjede između dvaju vozila koja komuniciraju i ne daje precizan uvid u broj 2-skok susjeda pojedinog vozila. Kao što je prikazano na slici 3.43 može se pretpostaviti da čvor *A* ima za 1-skok susjeda čvor *B* koji ima približno isti komunikacijski domet kao i čvor *A*. Čvor *B* šalje *beacon* poruku čvoru *A* u kojoj je sadržan broj njegovih 1-skok susjeda koji trebaju automatski biti 2-skok susjedi čvoru *A*. Budući da se komunikacijski dometi oba čvora preklapaju, oni su 1-skok susjedi istim čvorovima crvene boje koji su uključeni u broj 1-skok susjeda u *beacon* poruci. Stoga je potrebno što preciznije odrediti koliko je 1-skok susjeda koji nisu zajednički (zeleni) u tom broju za svaki 1-skok susjed pojedinog čvora. Ako bi uključili u *beacon* poruku i GPS podatke svakog susjeda, veličina *beacon* poruke bi značajno narasla i ne bi više predstavljala zanemariv trošak u komunikaciji. Budući da OBU ima dovoljne računalne sposobnosti i za složenije izračune, manji je trošak provesti proračun prema kojemu se može odrediti taj broj. Određivanje broja susjeda koji nisu zajednički vrši se tako da se odredi kolika je površina *P* osjenčanog dijela komunikacijskog dometa čvora *B* koji je različit od komunikacijskog dometa čvora *A* u odnosu na površinu cijelog kruga i s tom vrijednošću se pomnoži broj 2-skok susjeda.



Slika 3.43. Određivanje površine za brojanje 2-skop susjeda

Površina P se računa tako da se prvo izračuna površina sektora kružnice P_K i od nje se oduzme površina trokuta ACD te se dobivena vrijednost pomnoži s brojem dva jer je presjek kružnica identičan s lijeve i desne strane dužine C i D kao što je opisano u [64] (slika 3.44), a zatim se od površine cijele kružnice oduzme se ta dobivena površina.



Slika 3.44. Određivanje površine kružnice koja nije zajednička objema kružnicama

Površina sektora kružnice P_K može se izračunati prema sljedećem izrazu (3-14):

$$P_K = \frac{\theta}{2} r^2 \quad (3-14)$$

θ je središnji kut sektora kružnice u radianima i gledajući trokut ACD može se vidjeti da su dvije stranice jednake r , a visina trokuta je jednaka $d/2$ te se korištenjem trigonometrije dobije sljedeći izraz (3-15):

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{d}{2r} \quad (3-15)$$

Prema tome se može izračunati θ kao što je prikazano u izrazu (3-16):

$$\frac{\theta}{2} = \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) \Rightarrow \theta = 2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) \quad (3-16)$$

Tako se dobije da je površina sektora kružnice P_K jednaka izrazu (3-17):

$$P_K = \frac{\theta}{2} r^2 \Rightarrow P_K = \frac{2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)}{2} r^2 \Rightarrow P_K = r^2 \cos^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) \quad (3-17)$$

Površinu trokuta ACD može se izračunati prema izrazu (3-18) korištenjem c za duljinu između točaka C i D :

$$P_{Tr} = \frac{d * c}{4} \quad (3-18)$$

Pomoću Pitagorinog poučka dobije se izraz (3-19):

$$\left(\frac{c}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 = r^2 \Rightarrow c^2 + d^2 = 4r^2 \Rightarrow c = \sqrt{4r^2 - d^2} \quad (3-19)$$

Stoga se površina trokuta može definirati kao (3-20):

$$P_{Tr} = \frac{d * c}{4} \Rightarrow P_{Tr} = \frac{d}{4} \sqrt{4r^2 - d^2} \quad (3-20)$$

Površina presjeka obiju kružnica P_p može se izračunati tako da se od površine sektora kružnice P_K oduzme površina trokuta P_{Tr} i pomnoži se s brojem dva (3-21):

$$P_p = 2 * (P_K - P_{Tr}) \quad (3-21)$$

$$P_p = 2 * (r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} \sqrt{4r^2 - d^2})$$

Površinu P komunikacijskog dijela dometa čvora B koji je različit od komunikacijskog dometa čvora A računa se prema izrazu (3-22):

$$P = P_{Kruž} - P_p \Rightarrow P = r^2 \pi - 2 * (r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} \sqrt{4r^2 - d^2}) \quad (3-22)$$

Nakon toga se može izračunati omjer površine dometa signala koji pokriva vozilo B , a nije u komunikacijskom dometu vozila A u odnosu na površinu njegovog cijelog dometa signala kako bi se dobio faktor s kojim će se pomnožiti broj 2-skok susjeda, tj. realniji broj susjeda koji se ne nalazi u komunikacijskom presjeku dometa obaju vozila koji se temelji na polumjeru dometa signala r i na udaljenosti između dvaju vozila d (3-23):

$$\gamma = \frac{r^2 \pi - 2 * (r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} \sqrt{4r^2 - d^2})}{r^2 \pi} \quad (3-23)$$

Stoga realni broj 2-skok susjeda za čvor i iznosi (3-24):

$$N_{REAL i 2-hop} = \gamma_i * N_{i 2-hop} \quad (3-24)$$

3.5.3. Određivanje granice gustoće vozila na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela

Iz literature su izdvojena dva načina određivanja granice gustoće vozila na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela. U radu [31] opisana je metoda OppCast za učinkovito razošiljanje poruka u 1D scenariju autocesta u okolinama s gustim i rijetkim prometom. Jedan od glavnih ciljeva metode OppCast je smanjivanje ukupnog broja razošiljanih poruka i to se postiže proširivanjem metode s dvjema funkcionalnostima.

Prva odabire pomoćni čvor koji je najbliži sredini između pošiljatelja i razošiljača koji će također razošiljati poruke da bi se povećala pouzdanost dostave poruka u slučaju da ju neki susjedi nisu primili. Druga koristi SCF model komunikacije za okoline s rijetkim prometom i omogućuje prenošenje poruka do nepovezanih čvorova. Optimalna granicu za promjenu komunikacijskog modela određena je analitički i eksperimentalno. U izrazu (3-25) korištena je analitička funkcija za izračun vjerojatnosti da je mreža povezana:

$$P_F = \sum_{k=1}^N P_F(k, L), N = \left\lfloor \frac{FR_{opt}}{L} \right\rfloor \quad (3-25)$$
$$P_{connect} = P_F^{\frac{\alpha}{E[Y]}}$$

gdje je FR_{opt} optimalni komunikacijski domet koji u ovom slučaju iznosi 250 m, α je duljina regije interesa i iznosi 5 km i $E[Y]$ je prosječna duljina 1-skoka zone.

Rezultati pokazuju da je optimalna vrijednost granice promjene komunikacijskog modela između 15 i 20 vozila po km uz vjerojatnost omjera primanja paketa (engl. *packet reception ratio*) 0.95. U eksperimentima su uspoređene granice od 0, 10, 15, 20 i 30 vozila/km i može se zaključiti je da je optimalna granica za promjenu komunikacijskog modela 20 vozila/km. Budući da je korišten scenarij u simulacijama autocesta, teško je izravno uspoređivati ga sa scenarijima koji su korišteni u disertaciji i koji uključuju gusto naseljeno gradsko i prigradsko područje. Isto tako, komunikacijski je domet u navedenom radu 250 m, a u simulacijama u disertaciji izmjeren je najveći komunikacijski domet malo iznad 500 m.

GeoDTN+Nav [55] je hibridni protokol usmjeravanja koji kombinira geografsko usmjeravanje i SCF model komunikacije. U gustim ili povezanim mrežama koristi geografsko usmjeravanje i usmjerava pakete dvama načina: pohlepnom i opsežnim usmjeravanjem. Može otkriti dijeljenje mreže i poboljšati dostavu paketa prelaskom na DTN razošiljanje. Svako vozilo

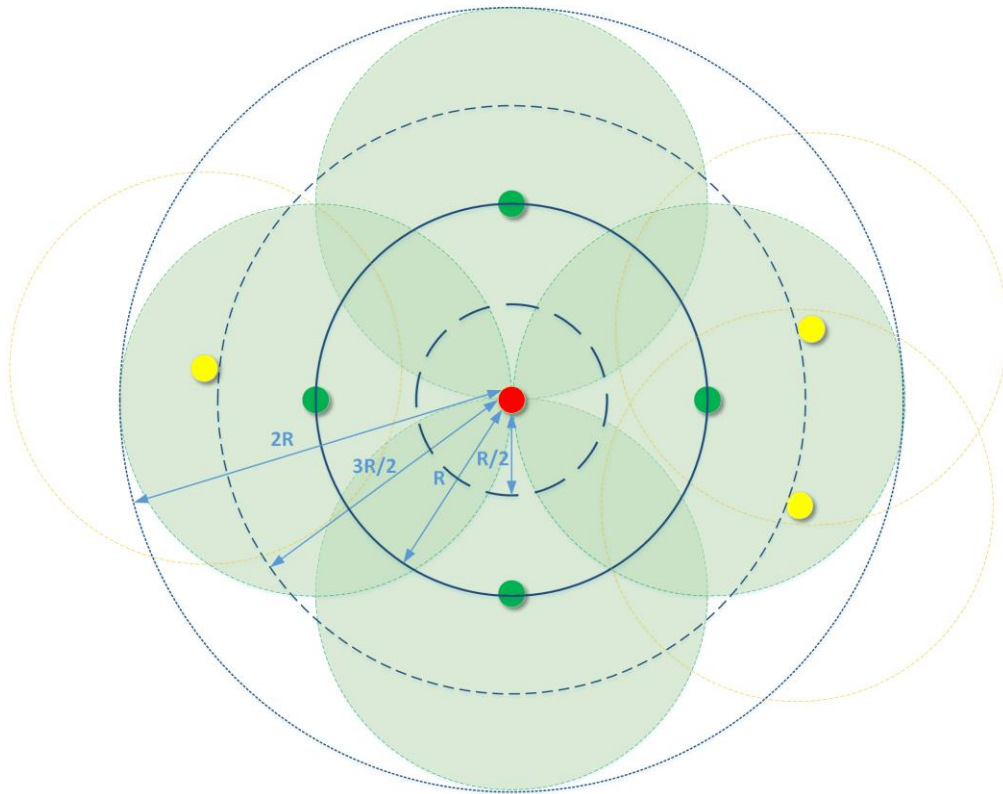
računa bodove prebacivanja (engl. *switch score*) prema bodovnoj funkciji prikazanoj u izrazu (3-26).

$$S(N_i) = \alpha P(h) \times \beta Q(N_i) \times \gamma Dir(N_i) \quad (3-26)$$

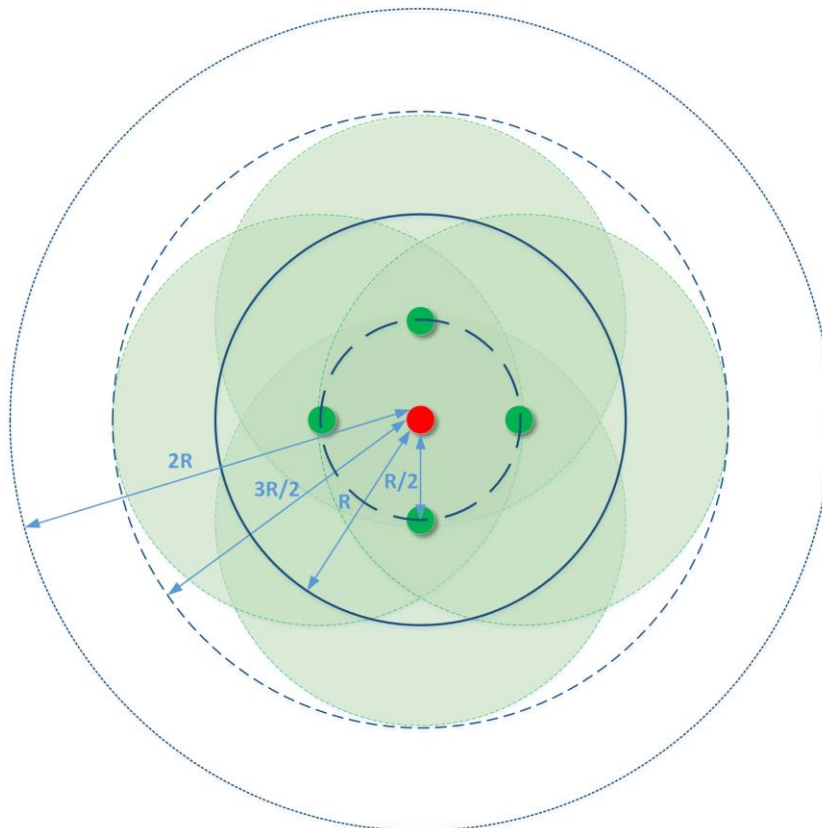
$P(h)$ je vjerojatnost da mreža nije spojena (od 0 do 1), $Q(N_i)$ kvaliteta dostave N_i u DTN mod (od 0 do 1), $Dir(N_i)$ smjer N_i (od 0 do 1), α , β , γ parametri sustava, N_i susjed čvora i , h broj skokova koje je paket prešao u opsežnom načinu usmjeravanja. Prilikom vrednovanja performansi izračunali su da je vrijednost granice iznad koje čvor prelazi u DTN razašiljanje iznosi $S_{thresh} = 0.1$. Budući da u predloženom algoritmu za učinkovito rasprostiranje poruka nisu razmatrane brojne informacije kao u protokolu GeoDTN+Nav, traži se jednostavnije rješenje za određivanje granice gustoće vozila na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela.

3.5.4. Analitički način određivanja granice gustoće vozila na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela

Granica na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela u ovom doprinosu određena je prema mogućnosti 1-skoka susjeda da što dalje prosljede primljene poruke od pošiljatelja. Ako čvor pošiljatelj ima samo četiri susjeda koja su u idealnoj poziciji (slika 3.45), njihov su domet i pokrivenost ostatka mreže gotovo idealni i širenje poruke će biti veliko. Mala je vjerojatnost da će se vozila naći u ovakvoj poziciji i stoga je potrebo razmotriti i položaj susjeda kada su bliže izvornom čvoru. Kada su 1-skok susjedi udaljeni $R/2$ od izvora, njihov domet i pokrivenost drastično opadaju iako se nalaze na idealnom geografskom položaju u odnosu na čvor pošiljatelj (slika 3.46). Zbog toga u ovom doprinosu prilikom određivanja gustoće definiran je minimalni broj 1-skoka susjeda za rad u V2V modelu komunikacije koji iznosi četiri. To je u skladu s metodom usmjerenom prema pošiljatelju koja je opisana u poglavlju 3.3.2 u kojoj se u prvom koraku odabiru četiri razašiljača. Dodatni je uvjet da dva od ta četiri čvora budu udaljena više od $R/2$ od izvornog čvora jer ako se vozilo nalazi na cesti okruženoj velikim preprekama ili zgradama, može se očekivati da će vozila biti puno udaljenija po osi kretanja od onih koja se nalaze na poprečnoj osi zbog blokiranja signala uzrokovanog ometanjem zgrada i prepreka. U sljedećem koraku, kao što je prikazano na slici 3.45, svaki 1-skok susjed treba imati barem dva susjeda koja nisu zajednička s izvornim čvorom da bi učinkovito proširio poruku dalje. To je dodatni uvjet u određivanju granice gustoće prometa na kojoj dolazi do promjene komunikacijskog modela.



Slika 3.45. Dometi četiri 1-skok susjeda koji su smješteni na idealnom geografskom položaju



Slika 3.46. Domet četiri 1-skok susjeda koja su udaljena najviše $R/2$ od izvornog čvora

Uvođenje broja 2-skoka susjeda u izračun gustoće prometa daje manju fluktuaciju u gustoći što znači i manji broj promjena komunikacijskog modela što posljedično dovodi do boljih performansi (slika 3.42). Budući da se vozila nalaze u gradskim područjima gdje je domet signala puno veći po osi kretanja vozila, minimalni broj 2-skoka susjeda mora biti barem 1.5 puta broj 1-skoka susjeda da bi vozilo ostalo u V2V načinu rada. Postupak za određivanje uvjeta promjene komunikacijskog modela iz V2V i SCF i obrnuto prikazan je u nastavku.

$$SCF \leftarrow \begin{cases} \text{Ako je } (N_{1\text{-skok}} < 4 \parallel N_{1\text{-skok} > \frac{R}{2}} < 2) \ \&\& \ ! (N_{2\text{-skok}} > N_{1\text{-skok}} \times 3) \\ \text{Ako je } (N_{1\text{-skok}} < 6 \parallel N_{1\text{-skok} > \frac{R}{2}} < 2) \ \&\& \ (N_{2\text{-skok}} < N_{1\text{-skok}} \times 1.5) \end{cases}$$

$$V2V \leftarrow \begin{cases} \text{Ako je } (N_{1\text{-skok}} > 6) \\ \text{Ako je } (N_{1\text{-skok}} \geq 4) \ \&\& \ (N_{1\text{-skok} > \frac{R}{2}} \geq 2) \ \&\& \ (N_{2\text{-skok}} > N_{1\text{-skok}} \times 1.5) \end{cases}$$

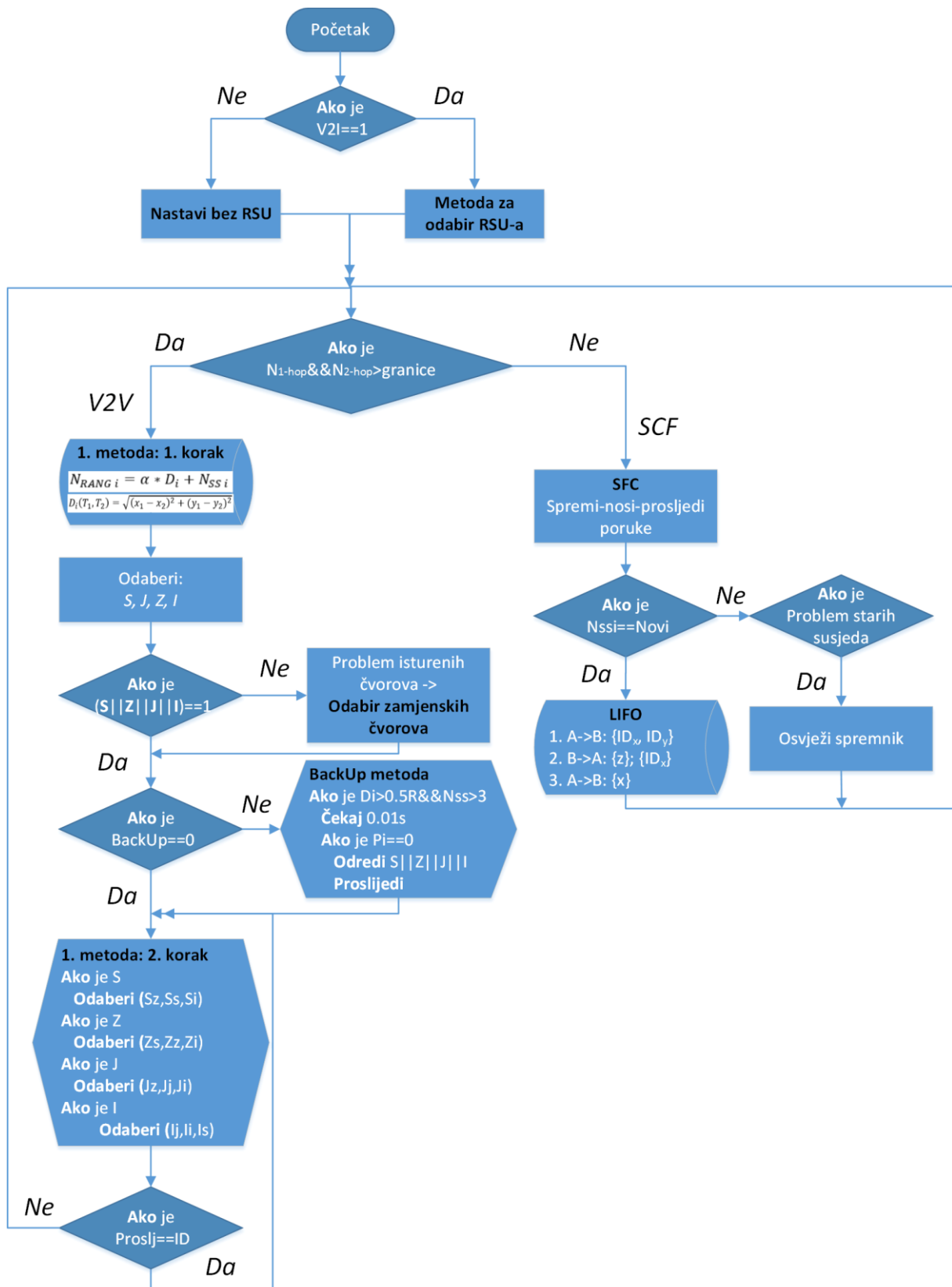
U uvjete postupka dodaje se odstupanje u broju 1-skoka i 2-skoka susjeda da bi se promjena komunikacijskog modela događala što rjeđe. Prilikom promjene komunikacijskog modela iz V2V u SCF ako je broj 1-skoka susjeda koji su udaljeni barem $R/2$ od izvornog čvora manji od dva, i pri tome je i broj 2-skoka susjeda manji od 1.5 puta broj 1-skoka susjeda, prijelaz je u SCF komutacijski model moguć kada ukupni broj 1-skoka susjeda padne već ispod šest. S ovim se uvjetima žele izbjeći situacije u kojima je veći broj 1-skoka susjeda jako blizu izvornom čvoru, a gustoća je prometa u većoj okolini mala. Ovakav slučaj je moguć kada vozila kreću u koloni u scenariju s rijetkim prometom. Redovna promjena u SCF komunikacijski model događa se ako broj 1-skoka susjeda padne ispod četiri ili broj 1-skoka susjeda koji su udaljeni barem $R/2$ padne ispod dva uz dodatni uvjet da broj 2-skoka susjeda nije tri puta veći od broja 1-skoka susjeda. Ovaj dodatni uvjet osigurava nepotrebnu promjenu komunikacijskog modela ako se čvor nalazi u gustom dijelu mreže, a u njegovom trenutnom komunikacijskom dometu nema puno susjeda. Promjena komunikacijskog modela iz SCF u V2V događa se kad je broj 1-skoka susjeda veći od šest zbog pretpostavke da je gustoća veće okoline zadovoljavajuća i važno je što brže rasprostrirati poruke uz što manje opće troškove, a SCF zahtijeva tri koraka u razmjeni poruka što je puno veći opći trošak od razošiljanja poruka. Redovni uvjet za prelazak na V2V model komunikacije je ako je broj 1-skoka susjeda veći ili jednak četiri pod uvjetom da postoje dva ili više 1-skoka susjeda koja su udaljena više od $R/2$ od izvornog čvora i da je broj 2-skoka susjeda barem 1.5 puta veći od broja 1-skoka susjeda.

3.6. Vrednovanje performansi algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka

Radi boljeg uvida u strukturu predloženog algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovanog na trenutnom položaju vozila nazvanog GEO-VS algoritam na slici 3.47 prikazan je dijagram toka sa svim većim komponentama algoritma. Nakon toga je provedeno vrednovanje performansi GEO-VS algoritma da bi se dokazala njegova učinkovitost u rasprostiranju poruka u ad-hoc mrežama vozila.

3.6.1. Grafički prikaz funkcionalnosti algoritma

U poglavljima iznad detaljno su prikazani svi veći i važniji dijelovi algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovanog na trenutnom položaju vozila, a na slici 3.47 prikazan je dijagram toka kompletnog algoritma. Na početku algoritma provjerava se uvjet korištenja infrastrukture. V2I model komunikacije nije implementiran u algoritam zbog toga što je infrastruktura skupa za implementaciju i održavanje te je u vlasništvu operatera, no ukoliko je potrebno može se implementirati na početku algoritma. Ključno se grananje u algoritmu događa prilikom izračuna lokalne gustoće prometa. Ovisno o broju 1-skok susjeda N_{1-skok} i 2-skok susjeda N_{2-skok} donijet će se odluka koji će se komunikacijski model koristiti. Ako je lokalna gustoća prometa veća od granice promjene komunikacijskog modela, algoritam se nastavlja izvoditi u V2V grani algoritma. Ako je na čvoru na kojemu se izvršava algoritam opažen novi događaj i kreirana nova poruka, na njemu započinje izvršavanje prvog koraka prve metode usmjerene prema pošiljatelju u kojoj se čvorovi rangiraju i nakon toga se odabiru četiri razašiljača. Ako je čvor na kojemu se algoritam izvodi odabran za razašiljača, na njemu se izvršava drugi korak prve metode u kojemu se na temelju strane razašiljača *psID* u odnosu na pošiljatelja određuju tri sljedeća razašiljača. Ako čvor na kojemu se izvršava algoritam nije odabran za razašiljača, pokreće BackUp metodu u kojoj se provjerava zadovoljava li uvjete da postane BackUp razašiljač. Ako je na početku algoritma gustoća promjene komunikacijskog modela manja od granice, algoritam se nastavlja izvršavati u SCF grani algoritma. Primitljive poruke se spremaju u spremnik poruka i nakon primitka svake *beacon* poruke provjera se je li riječ o novom ili starom susjedu. Ako je novi susjed, pokreće se proces sinkronizacije spremnika poruka između tih dvaju čvorova, a ako je stari susjed, provjera se je li se pojavio problem „starih susjeda“. Na kraju SCF grane vraća se na izračun gustoće prometa, a na kraju V2V grane vraća se na izračun gustoće prometa samo ako čvor nije odabran kao razašiljač. Ako je čvor odabran kao razašiljač, nastavlja se izvođenje algoritma u drugom koraku prve metode.



Slika 3.47. Dijagram toka algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovan na njihovom trenutnom položaju

3.6.2. Simulacijski rezultati i vrednovanje performansi algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka

Simulacije primjene algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovanog na trenutnom položaju vozila provedene su korištenjem okoline i simulacijskih postavki kao što je prikazano u tablici 3.1. Kao simulacijsko je okruženje za kreiranje što realističnijih simulacija za ad-hoc mreže vozila korišten Veins 2.1. simulator otvorenog izvornog koda. Temelji se na dvama dobro poznatim simulatorima: Omnet++, mrežnom simulatoru temeljenom na događajima i SUMO (engl. *Simulation of Urban MObility*) simulatoru cestovnog prometa. Omnet++ u fizičkom sloju sadrži MiXiM [65] koji omogućuje korištenje preciznih modela interferencije signala i ometanja signala statičnim i pokretnim preprekama. Model je ometanja signala koji je korišten u simulacijama Simple Obstacle model. SUMO se koristi za generiranje kretanja vozila. Svako vozilo je eksplicitno modelirano, ima svoju rutu i kreće se individualno kroz mrežu. Oba simulatora, Omnet++ i SUMO, dvosmjerno su povezana i simulacije se provode *online*. Na ovaj se način može modelirati utjecaj mreže vozila na promet i mogu se istražiti složene interakcije između obaju područja. Uz navedeno je korišten i VACaMobil OMNET++ modul za modeliranje mobilnosti vozila koji omogućuje korištenje konstantnog broja vozila tijekom trajanja cijele simulacije. Model kretanja vozila u simulacijama je Krauß model u kojemu je definirana maksimalna brzina od 70 m/s, maksimalno ubrzanje od 2.6 m/s², maksimalna brzina kočenja od 4.5 m/s² i standardna dužina vozila od 5 m. U svim se mjerenjima koriste tri različite gustoće prometa (50, 500 i 1000 vozila u mreži) da bi se vrednovala učinkovitost algoritma u situacijama s vrlo rijetkim, srednjim i gustim prometom. Ukupno trajanje pojedine simulacije je 300 s. Simulacije su provedene na karti grada Leuvena (Belgija) koja je dobivena korištenjem *online* izvora OpenStreetMaps. Učitana karta je dimenzija 6x7 km i simulacijski scenarij obuhvaća gusto naseljeno gradsko i prigradsko područje kao što je prikazano na slici 4.10. Komunikacijski protokoli koji se koriste u simulacijama su standardni protokoli za ad-hoc mreže vozila, IEEE 802.11p i IEEE 1609.4 DSRC/WAVE koji rade na 5.9 GHz uz maksimalni komunikacijski domet od 1000 m. U simulacijama je opaženo da je najveći domet signala bio nešto veći od 500 m. Uzrok tomu je korišteni scenarij koji uključuje puno prepreka poput velikih zgrada i gradskih blokova.

Za dokazivanje učinkovitog rasprostiranja poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovanog na trenutnom položaju vozila simulacijski rezultati predloženog GEO-VS algoritma uspoređuju se sa sljedećim dvama unaprijednim komunikacijskim modelima koji su detaljno opisani ranije u disertaciji:

- unaprijeđeni SCF – u ovom se komunikacijskom modelu koristi spremanje, prenošenje i razmjena informacija u slučaju kontakta s novim susjedom bez korištenja metode poplavljiivanja porukama. Simulacije u poglavlju 3.4.5. pokazuju da SCF komunikacijski model daje najbolje performanse za *beacon* interval od 2 s, pa se u unaprijeđenom SCF modelu koristi upravo taj interval. Optimizirana su i četiri koraka razmjene informacija između vozila te su smanjena u tri koraka što omogućava bržu razmjenu informacija.
- V2V-SRBR – u ovom se komunikacijskom modelu koristi unaprijeđeno poplavljiivanje porukama sa statičnom vrijednošću razošiljanja poruke. Simulacije u poglavlju 3.2.1. pokazuju da unaprijeđeno poplavljiivanje porukama daje najbolje performanse za vjerojatnost razošiljanja poruka $p = 0.6$, i stoga je ta vrijednost korištena u ovom komunikacijskom modelu.

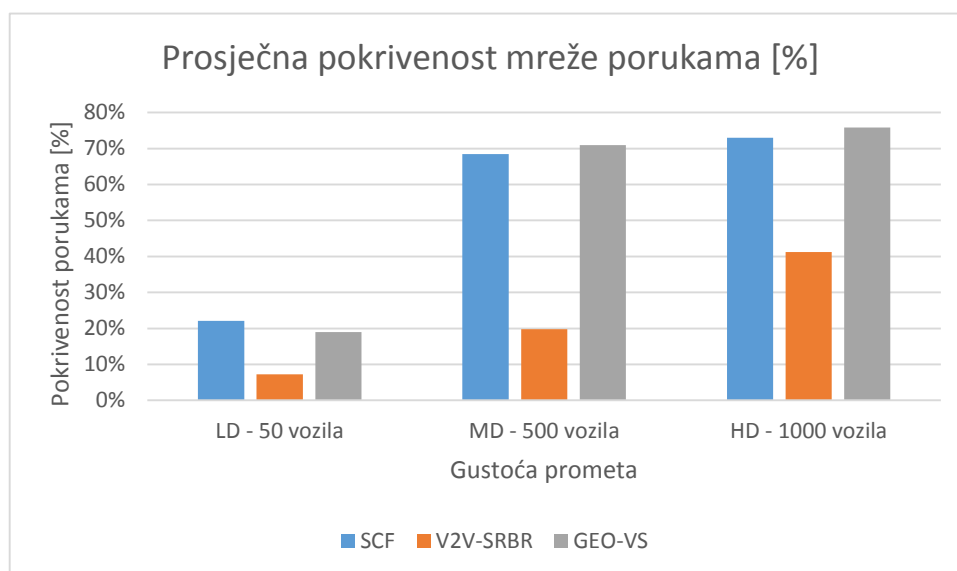
Za vrednovanje performansi GEO-VS algoritma korištena su sljedeća mjerila vrednovanja koja najpotpunije opisuju učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila:

- prosječna pokrivenost mreže porukama
- prosječno kašnjenje u dostavljanju poruka
- opterećenje mreže, prosječan domet poruka
- rasprostiranje poruka kroz vrijeme.

U nastavku su detaljno opisana korištena mjerila vrednovanja, prikazani su rezultati mjerenja dobiveni simulacijama te je iznesena diskusija i usporedba rezultata s unaprijeđenim SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije.

Prosječna pokrivenost mreže porukama pokazuje prosječni postotak vozila do kojih su došle podatkovne poruke. Neka su poruke generirane u početku simulacije i u povezanijem dijelu mreže pa će biti dostavljene gotovo svim vozilima u mreži, a neke su generirane tek na kraju simulacije ili u nepovezanim dijelovima mreže i stoga će biti dostavljene vrlo malom broju vozila. U izrazu (3-3) prikazana je formula za izračun pokrivenosti. Na slici 3.48 prikazana je usporedba rezultata prosječne pokrivenosti mreže porukama GEO-VS algoritma s unaprijeđenim SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije. U svim trima gustoćama prometa GEO-VS algoritam ima značajno veću pokrivenost mreže porukama u odnosu na V2V-SRBR model komunikacije. Razlog je taj što V2V-SRBR model komunikacije rasprostire poruke principom poplavljiivanja s višestrukim skokovima i poruke mogu biti dostavljene samo vozilima koja su povezana s izvornim vozilom, a vozila u nepovezanim dijelovima mreže tu

poruku neće primiti. U GEO-VS algoritmu u slučaju male lokalne gustoće prometa vozilo će prijeći u SCF način rada i tako će prenositi poruke do nepovezanih dijelova mreže što rezultira znatno većom pokrivenošću mreže. U usporedbi s unaprijeđenim SCF modelom komunikacije GEO-VS daje veću pokrivenost za gustoće prometa MD i HD u mreži, a za gustoću LD daje manju pokrivenost. Razlog veće pokrivenosti u gustoćama prometa MD i HD je što GEO-VS algoritam u situacijama s većom lokalnom gustoćom prometa koristi V2V model komunikacije s inteligentnim poplavljanjem porukama koji vrlo brzo rasprostire poruke prema većem broju susjeda što rezultira učinkovitijom razmjenom poruka u dijelovima mreže s malom lokalnom gustoćom vozila gdje se koristi SCF način rada. Kod gustoće vozila LD pokrivenost u GEO-VS algoritmu je manja što nije uobičajeno jer je u mreži jako mali broj vozila te je lokalna gustoća vozila stalno ispod granice i GEO-VS algoritam je u cijeloj simulaciji bio u SCF načinu rada.

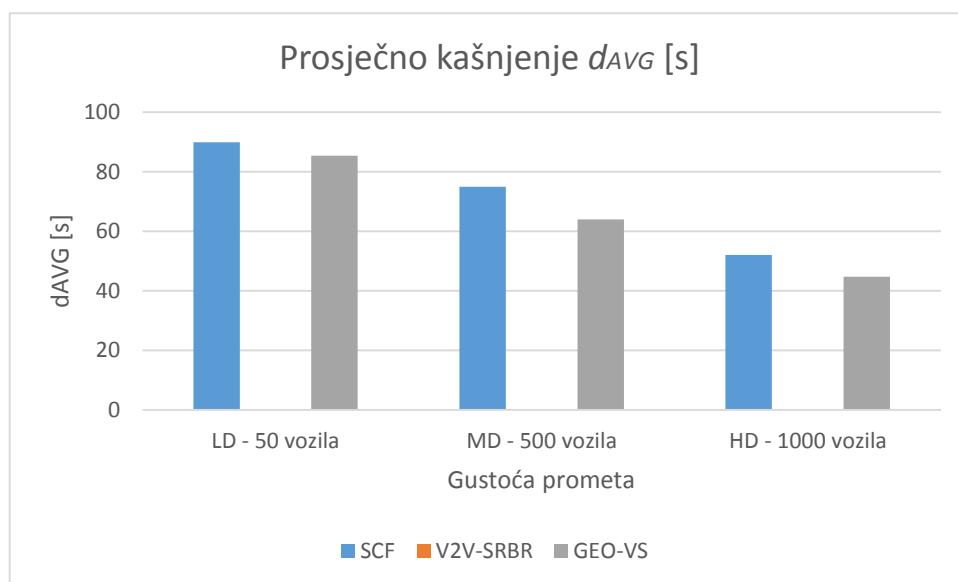


Slika 3.48. Usporedba prosječne pokrivenosti mreže porukama GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije

Iako bi se moglo očekivati da će GEO-VS algoritam osigurati stopostotnu pokrivenost mreže zbog kombiniranog korištenja V2V i SCF modela komunikacije, to se događa za poruke koje su duže vrijeme u simulaciji. Neke su poruke generirane tek pri kraju simulacije ili u odvojenim i nepovezanim dijelovima mreže s vrlo malim brojem vozila koja možda neće doći u komunikacijski domet s ostatkom mreže te stoga njihova pokrivenost mreže nije stopostotna. Također, testna karta je velika (6x7 km), a vrijeme simulacije je prekratko (300 s) da bi vozila prošla kroz veći dio karte i susrela se s većim brojem vozila i s njima razmijenila poruke. Prema tome se može zaključiti da GEO-VS ima značajno veću prosječnu pokrivenost mreže porukama

u svim gustoćama prometa u odnosu na V2V-SRBR model komunikacije i malo veću prosječnu pokrivenost mreže porukama u odnosu na unaprijeđeni SCF model komunikacije za gustoće vozila MD i HD zbog toga što koristi kombinaciju V2V i SCF modela komunikacije koji mu omogućuju brzo rasprostiranje poruka u situacijama s većom lokalnom gustoćom prometa te učinkovitu razmjenu poruka u situacijama s malom lokalnom gustoćom prometa.

Prosječno kašnjenje u dostavljanju poruka u mreži pokazuje prosječnu količinu proteklog vremena između trenutka generiranja nekog događaja u vozilu i slanja prve poruke o tom događaju do trenutka primanja te poruke na ostalim vozilima. Računa se tako da se prvo izračuna zbroj kašnjenja pojedine poruke na svim čvorovima na kojima je primljena kao što je prikazano u izrazu (3-1). Zatim se zbrajaju sva kašnjenja svih poruka u mreži koja u omjeru s ukupnim brojem svih čvorova koja su primila poruke čini prosječno kašnjenje dostave poruka kao što je prikazano u izrazu (3-2). Na slici 3.49 prikazani su rezultati usporedbe prosječnog kašnjenja GEO-VS algoritma s unaprijeđenim SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije. Kao što je bilo i očekivano V2V-SRBR model komunikacije ima značajno manje kašnjenje u usporedbi s ostalim metodama jer se u tom modelu poruke rasprostiru principom poplavlivanja s višestrukim skokovima. Iako se kašnjenje u V2V-SRBR modelu komunikacije broji u milisekundama, nedostatak je što će poruke biti dostavljene samo vozilima koja su povezana s izvornim vozilom, a ostala vozila neće dobiti poruke. To rezultira i značajno manjom pokrivenošću porukama kao što je vidljivo na slici 3.48.



Slika 3.49. Usporedba prosječnog kašnjenja u dostavljanju poruka GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije

Uspoređujući GEO-VS algoritam s unaprijeđenim SCF modelom komunikacije može se uočiti da GEO-VS brže dostavlja poruke iako ih za gustoće prometa MD i HD dostavlja i većem broju vozila kao što je prikazano na slici 3.48. Razlog tomu je što GEO-VS algoritam u slučaju velike lokane gustoće prometa koristi V2V model komunikacije s inteligentnim poplavljanjem poruka što rezultira vrlo malim kašnjenjem. Može se zaključiti da iako V2V-SRBR model komunikacije ima značajno manje kašnjenje u dostavljanju poruka, to rezultira s vrlo malom pokrivenošću mreže te veliki broj vozila neće primiti poruke i neće biti informirana o događajima u mreži.

Opterećenje mreže računa se tako da se broje sve zalihsne poruke u mreži i razmijenjene poruke u SCF načinu rada. U tablici 3.7 prikazana je usporedba ukupnog broja zalihsnih poruka u mreži za V2V-SRBR model komunikacije i GEO-VS algoritam. Kao što se može vidjeti GEO-VS značajno manje opterećuje mrežu sa zalihsnim porukama što je rezultat implementacije metoda usmjerenih prema pošiljatelju i primatelju koje se koriste u V2V modelu komunikacije i koje značajno smanjuju broj razaslijanih poruka. Za gustoću vozila LD broj zalihsnih poruka je nula što znači da je GEO-VS algoritam tijekom cijele simulacije bio u SCF načinu rada. Unaprijeđeni SCF model komunikacije nije prikazan u tablici jer je broj zalihsnih poruka nula. Razlog tomu je što se u unaprijeđenom SCF modelu komunikacije koristi pojedinačno razaslijanje i sve su poruke adresirane za točno određenog primatelja te ih ostala vozila neće primiti. U tablici 3.8 prikazana je usporedba ukupnog broja razmijenjenih poruka u mreži u SCF načinu rada za unaprijeđeni SCF model komunikacije i GEO-VS algoritam.

Tablica 3.7. Prikaz količine zalihsnih poruka u mreži za V2V-SRBR model komunikacije i GEO-VS algoritam

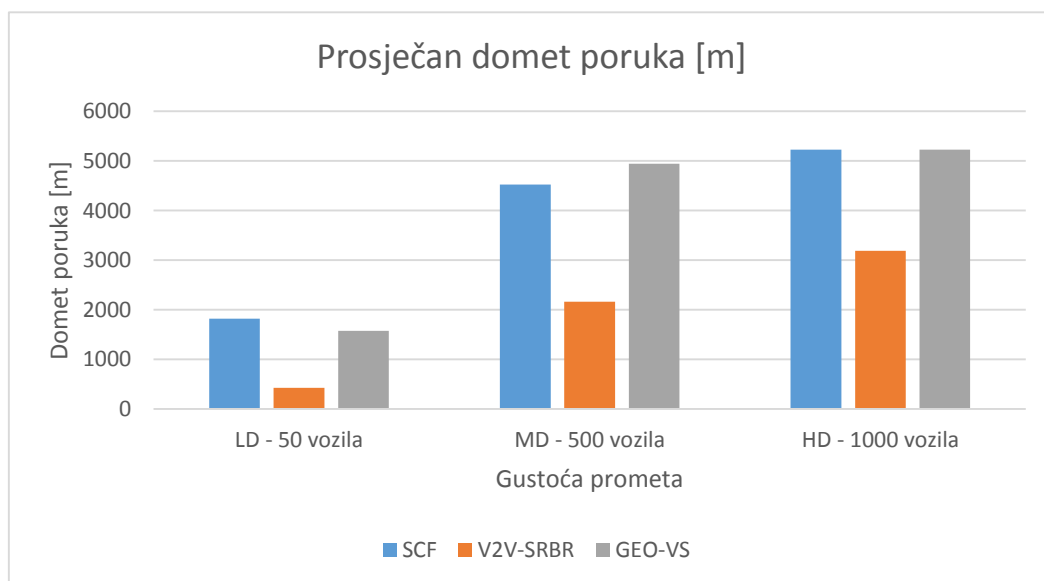
	V2V-SRBR	GEO-VS
LD - 50 vozila	73	0
MD - 500 vozila	67589	53221
HD - 1000 vozila	569722	303660

Tablica 3.8. Prikaz količine razmijenjenih poruka u SCF načinu rada za SCF model komunikacije i GEO-VS algoritam

	SCF	GEO-VS
LD - 50 vozila	1350	1664
MD - 500 vozila	117586	29386
HD - 1000 vozila	392093	37616

Kao što se može vidjeti GEO-VS značajno manje opterećuje mrežu s razmijenjenim porukama pojedinačnog razaslanja između vozila u gustoći prometa MD i HD. U gustoći prometa MD taj je broj četiri puta manji dok je u gustoći prometa HD čak 10 puta manji. U gustoći prometa LD broj razmijenjenih poruka je za 18.87% veći u GEO-VS algoritmu. Ovaj rezultat je neuobičajen jer se može vidjeti da je u gustoći prometa LD GEO-VS algoritam cijelo vrijeme bio u SCF načinu rada, a ostvario je veći broj razmijenjenih poruka, manju pokrivenost i manji prosječni domet poruka. Stoga se može zaključiti da GEO-VS algoritam značajno manje opterećuje mrežu i povećava mrežnu propusnost jer smanjuje broj zalihsnih poruka u mreži s inteligentnim odabirom razasiljača što smanjuje ukupan broj razaslianih poruka. Također, značajno smanjuje i broj razmijenjenih poruka u SCF modelu komunikacije koji se koristi samo kada lokalna gustoća vozila padne ispod definirane granice.

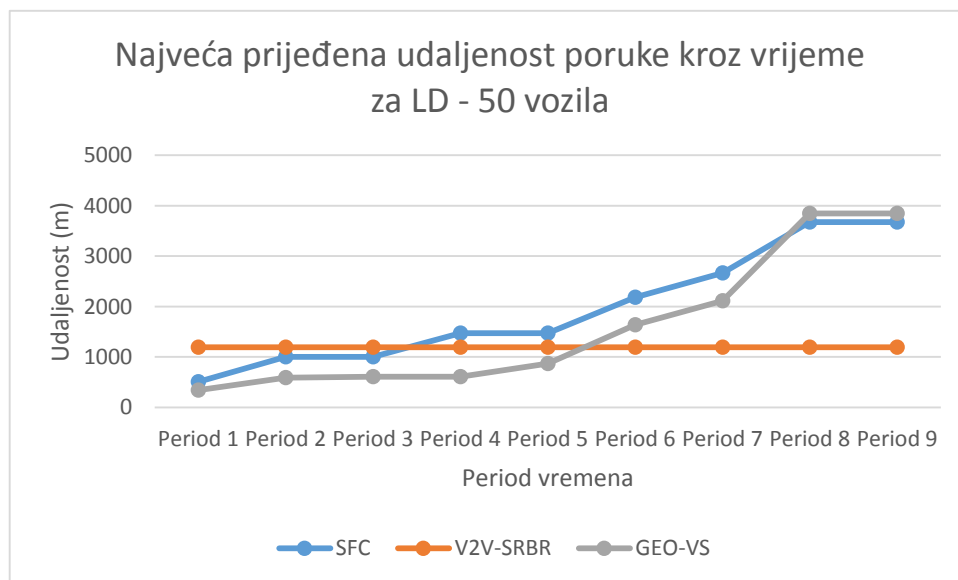
Prosječni domet poruka pokazuje kolika je prosječna maksimalna euklidska udaljenost poruke, prikazana u izrazu (3-10), od mjesta na kojemu je poruka nastala do najudaljenijeg čvora do kojega je dostavljena, tj. na kraju simulacije. Na slici 3.50 prikazana je usporedba prosječnog maksimalnog dometa poruka GEO-VS algoritma s unaprijeđenim SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije. Kao što se može vidjeti GEO-VS i unaprijeđeni SCF imaju značajno veći domet u odnosu na V2V-SRBR model komunikacije. Razlog tome je što V2V-SRBR model komunikacije ne prenosi poruke i generiranu će poruku na izvornom vozilu primiti samo njegovi susjedi s višestrukim skokovima, a poruke neće biti dostavljene u odvojene dijelove mreže.



Slika 3.50. Usporedba prosječnog dometa poruka GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije

Usporedba unaprijeđenog SCF modela komunikacije i GEO-VS algoritma pokazuje da u gustoći prometa LD unaprijeđeni SCF ima veći domet. Slabije performanse GEO-VS algoritma u gustoći vozila LD već su spomenute i očito je da GEO-VS algoritam ne donosi značajna poboljšanja u okolinama s vrlo malom gustoćom vozila. U gustoći prometa MD bolje performanse pokazuje GEO-VS algoritam koji prosječno rasprostire poruke gotovo 5000 m od izvora dok ih unaprijeđeni SCF rasprostire prosječno oko 4500 m. U gustoći prometa HD domet poruka je podjednak. Iz svega se može zaključiti da V2V-SRBR neće dostaviti poruke u udaljene dijelove mreže, unaprijeđeni SCF će najdalje dostaviti poruke u situacijama s rijetkim prometom, GEO-VS u situacijama sa srednjom gustoćom prometa u mreži dok će podjednako to napraviti u situacijama s vrlo gustim prometom u mreži.

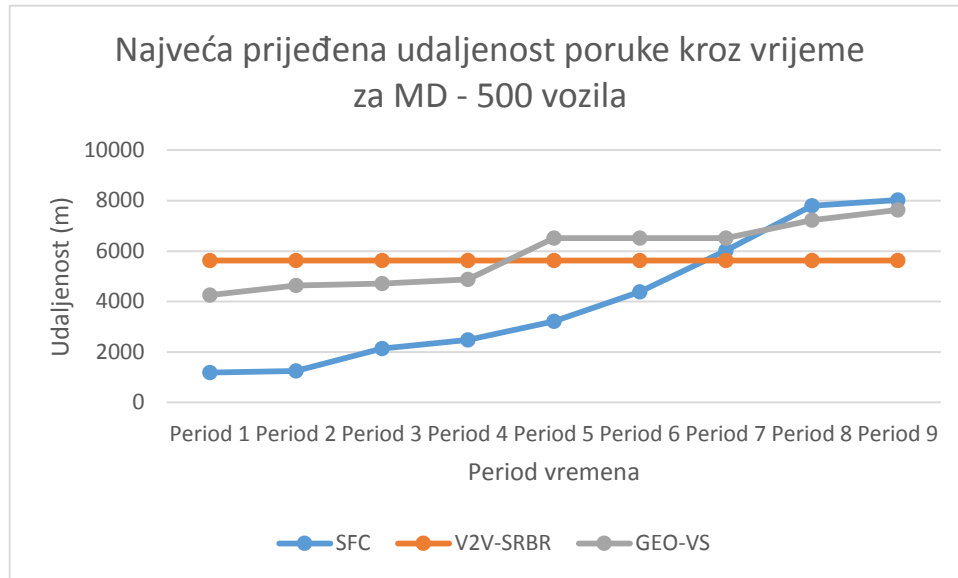
Rasprostiranje poruka kroz vrijeme bilježi se u devet različitih perioda, koji su prikazani na slici 3.33, za poruku koja je prevalila najveću udaljenost od mjesta na kojemu je nastala na kraju svakog perioda. Na slici 3.51 može se vidjeti da kod gustoće prometa LD u početnim periodima V2V-SRBR postiže najveću prijeđenu udaljenost poruke, no nakon toga ostaje konstantna i unaprijeđeni SCF i GEO-VS ga prestiču. Do perioda osam unaprijeđeni SCF ima veću prijeđenu udaljenost poruke u odnosu na GEO-VS, no u zadnjim dvama periodima poruke u GEO-VS algoritmu postižu veću konačnu prijeđenu udaljenost.



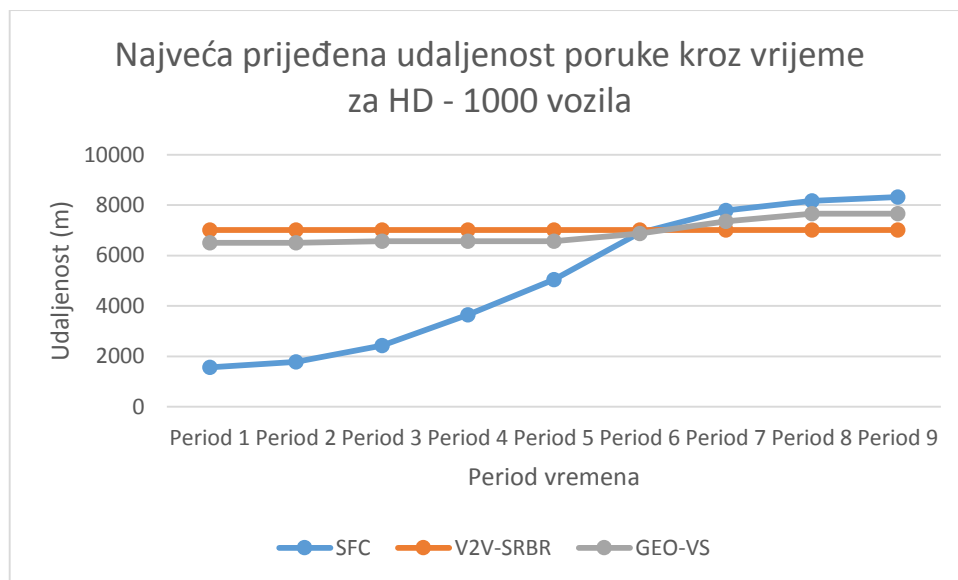
Slika 3.51. Usporedba najveće prijeđene udaljenosti poruka za LD gustoću prometa GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije

Na slici 3.52 u situacijama sa srednjom gustoćom prometa opet u prvim periodima najveću prijeđenu udaljenost imaju poruke u V2V-SRBR modelu komunikacije Nakon perioda pet

najveću prijedenu udaljenost imaju poruke u GEO-VS algoritmu. Poruke u unaprijedenom SCF modelu komunikacije imaju nekoliko puta manju prijedenu odaljenost do perioda sedam nakon kojega udaljenost značajno raste i prestiže V2V-SRBR i GEO-VS.



Slika 3.52. Usporedba najveće prijedene udaljenosti poruka za MD gustoću prometa GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije



Slika 3.53. Usporedba najveće prijedene udaljenosti poruka za HD gustoću prometa GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije

Na slici 3.53 GEO-VS i V2V-SRBR do perioda šest imaju podjednake i nekoliko puta veće prijedene udaljenosti poruka u odnosu na unaprijedeni SCF model komunikacije. Nakon perioda šest unaprijedeni SCF prestiže oba modela i postiže najveću maksimalnu udaljenost poruka od

izvora na kraju simulacije. Iz svega se može zaključiti da V2V-SRBR ima konstantnu najveću prijedenu udaljenost poruka kroz cijelo razdoblje simulacije zbog korištenja samo V2V poplavlivanja porukama koja je u prvim periodima veća od udaljenosti GEO-VS algoritma i unaprijeđenog SCF. Unaprijeđeni SCF ima puno manje prijedene udaljenosti do zadnjih triju perioda nakon kojih značajno raste i postiže najveće udaljenosti u tim zadnjim periodima. U svim periodima za sve tri gustoće prometa najveće prijedene udaljenosti GEO-VS algoritma su vrlo blizu maksimalnih vrijednosti što znači da pokazuje dobre performanse i u ovom mjerilu vrednovanja.

Na temelju rezultata simulacija može se zaključiti da GEO-VS algoritam daje jako dobre performanse i veću učinkovitost u odnosu na V2V-SRBR i unaprijeđeni SCF model komunikacije, pogotovo u situacijama sa srednjom i velikom gustoćom prometa. Nadalje, omogućava veću pokrivenost mreže porukama, smanjuje prosječno kašnjenje u dostavljanju poruka, značajno smanjuje opterećenje mreže i broj zalihosnih i razmijenjenih poruka u mreži, povećava prosječan domet poruka od izvora te pokazuje vrlo dobre performanse rasprostiranja poruka kroz vrijeme tijekom cijelog vremena trajanja simulacije. U situacijama s vrlo rijetkim prometom GEO-VS ne pokazuje značajne pomake u performansama te u usporedbi s unaprijeđenim SCF modelom komunikacije pokazuje slabije performanse. Razlog dobrim performansama u okolinama sa srednjom i velikom gustoćom prometa je što GEO-VS algoritam učinkovito kombinira V2V i SCF modele komunikacije ovisno o lokalnoj gustoći prometa te definiranoj granici. U situacijama s gustim prometom koriste se dvije metode za učinkovito poplavlivanje mreže porukama usmjerene prema primatelju i pošiljatelju koje ne opterećuju mrežu, a omogućavaju mala kašnjenja i brzo rasprostiranje poruka svim povezanim vozilima. Kada se vozilo nađe u situaciji s vrlo malom lokalnom gustoćom vozila, prelazi u SCF način rada u kojemu se spremljene poruke rasprostru na udaljene dijelove mreže koji nisu povezani i tako omogućuje veliki domet poruke i veliku pokrivenost mreže.

4. MODEL UČINKOVITOG RASPROSTIRANJA PORUKA KORIŠTENJEM VOZILA U MIROVANJU

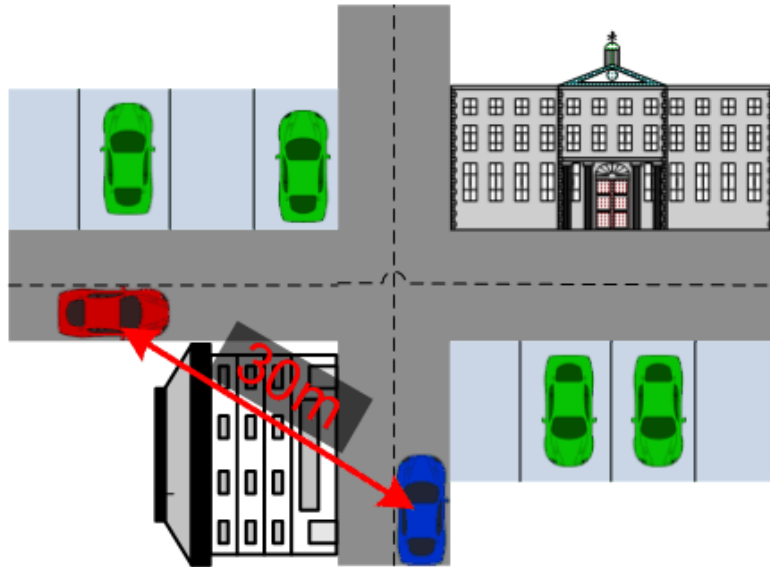
Prilikom male gustoće prometa na cestama mogu se primijeniti V2I i SCF komunikacijski modeli kako bi rasprostiranje poruka u mreži bilo učinkovitije, no oba komunikacijska modela imaju nedostatke. V2I oblik komunikacije daje vrlo mala kašnjenja, ali zahtijeva infrastrukturu čija su implementacija i održavanje skupi i dugotrajni i najčešće je u vlasništvu trećih osoba, a SCF oblik komunikacije ne treba infrastrukturu, ali se zbog pohranjivanja i prenošenja poruka značajno povećava vrijeme kašnjenja. Zbog činjenice da su vozila u prosjeku parkirana više od 23 sata na dan (preko 95% ukupnog vremena), potrebno ih je iskoristiti za komunikaciju i kada nisu u pokretu. Za parkirana vozila karakteristično je da se nalaze u velikom broju na malom prostoru, dugotrajno borave na istom mjestu, imaju široku raspodjelu i nalaze se na specifičnim i unaprijed poznatim lokacijama. Nadalje, akumulatori u vozilima imaju veliki kapacitet koji može omogućiti OBU da radi čak i tjedan dana do potpunog pražnjenja akumulatora što parkiranim vozilima omogućuje da sudjeluju u komunikaciji. Ove karakteristike omogućuju da se parkirana vozila uključe u komunikaciju i omoguće učinkovito rasprostiranje poruka u scenarijima s malom gustoćom prometa.

U drugom je izvornom znanstvenom doprinosu unaprijeđen predloženi algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka koji je razvijen u prvom doprinosu. U ovom je doprinosu predložen novi model komunikacije pod nazivom V2PV (engl. *Vehicle-to-Parked-Vehicle*) koji ima sljedeće prednosti: malo kašnjenje, povezivanje nepovezanih dijelova mreže, povećavanje gustoće vozila u scenarijima s rijetkim prometom na cestama i nisku cijenu implementacije jer nema potrebu za infrastrukturom. Dio ovog doprinosa objavljen je u radu [9].

4.1. Motivacija za korištenje vozila u mirovanju za učinkovito rasprostiranje poruka

Budući da je topologija u ad-hoc mrežama vozila vrlo dinamična i nepravilno raspodijeljena, učinkovita komunikacija s višestrukim skokovima, pogotovo u okolinama s rijetkim prometom, predstavlja veliki izazov. U radu [66] provedeni su, u suradnji s tvrtkom Audi AG, eksperimenti u stvarnoj okolini s IEEE 802.11p/DSRC sklopovljem koji su pokazali da ometanje signala zbog zgrada i ostalih prepreka u gradskim i prigradskim okolinama predstavlja veliki problem i značajno smanjuje komunikacijski domet uređaja OBU u automobilima. U mjerenjima je korištena antena visokog dobitka s omni zračenjem (engl. *high-*

gain omni-directional antennae) i komunikacijski uređaj koji je radio na punoj snazi. Pokazali su da komunikacija između dvaju vozila može biti prekinuta iako su oni jako blizu, čak na samo 30 m udaljenosti (slika 4.1).



Slika 4.1. Domet signala OBU uređaja u gradskim područjima

Gustoća mreže je vrlo važan čimbenik u komunikaciji u ad-hoc mrežama vozila. Da bi se uspješno i pravovremeno provela komunikacija s višestrukim skokovima, u mreži je potrebna određena gustoća vozila. Najmanja gustoća koja je potrebna za komunikaciju ovisi o dometu bežične komunikacije i okolini u kojoj se ona odvija. Na autocestama gdje nema prepreka i gdje je veliki vidokrug, domet bežične komunikacija je znatno veći nego u gradskim područjima. Također, problem komunikacije s višestrukim skokovima javlja se kada je gustoća vozila na cesti mala, u scenarijima tijekom noći i za vrijeme rijetkog prometa na cestama, u prigradskim područjima, u gradskim područjima s brojnim preprekama poput zgrada i gradskih blokova, u podzemnim garažama i nakon početne implementacije komunikacijskih uređaja u vozila. Zbog toga su za uspješnu V2V komunikaciju s višestrukim skokovima potrebna nova rješenja. Trenutni modeli komunikacije V2V, SCF i V2I imaju karakteristike koje su prikazane u nastavku:

- V2V model komunikacije
 - malo kašnjenje
 - nemogućnost dostave poruka vozilima koja nisu povezana
- SCF model komunikacije
 - nije potrebna infrastruktura

- veliko kašnjenje
- V2I model komunikacije
 - malo kašnjenje
 - skupa infrastruktura

Opsežnim proučavanjem prometa i parkiranih vozila uočene su sljedeće činjenice koje mogu poboljšati učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila u situacijama s malom gustoćom prometa na cestama:

- vozila su prema statistici parkirana prosječno više od 23 sata na dan
- parkirana vozila dugotrajno borave na istom mjestu
- postoji veliki broj parkirnih mjesta u gradskim područjima
- parkirana vozila imaju široku rasprostranjenost kroz mrežu
- akumulatori imaju zadovoljavajući kapacitet za rad s OBUs.

Ne temelju ovih činjenica razvila se ideja o korištenju parkiranih vozila za učinkovitiju komunikaciju u ad-hoc mrežama vozila. Kada su vozila parkirana, uređaj OBU se na dozvolu vozača može koristiti i tako parkirana vozila mogu sudjelovati u komunikaciji predstavljajući statičke čvorove u V2V komunikaciji. Korištenjem parkiranih vozila, pogotovo u situacijama s rijetkim prometom na cestama, povećat će se gustoća prometa i posljedično učinkovitost rasprostiranja poruka.

4.2. Pregled literature za rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju

Učinkovito rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju u ad-hoc mrežama vozila predstavlja relativno novo istraživačko područje i trenutno nema mnogo literature koja se bavi tom problematikom. U nastavku su opisana četiri najznačajnija znanstvena rada u području.

- PVA (engl. *Parked Vehicle Assistance*) [67] je sustav koji dopušta parkiranim vozilima da se pridruže ad-hoc mrežama vozila kao statični čvorovi te da služe kao statična kralježnica i uslužna infrastruktura za poboljšanje povezanosti. Proveden je analitički proračun i simulacije za dokazivanje utjecaja parkiranih vozila na povezanost ad-hoc mreže vozila. Za simulacije je korišten VanetMobiSim-1.1 [68] u sljedećim simulacijskim uvjetima: karta dimenzija 1660x1400 m s devet raskrižja i 14 dvosmjernih cesta, s gustoćom prometa od 60, 100, 200, 300 i 400 vozila. Dokazali su da se korištenjem samo 10% ili 30% od ukupnog broja parkiranih vozila u komunikaciji

u odnosu na komunikaciju bez korištenja parkiranih vozila može značajno povećati broj veza između vozila i trajanje te znatno smanjiti period nepovezanosti vozila. U predloženom modelu učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju nije pretpostavljeno da su sva parkirana vozila dostupna za komunikaciju nego samo 5-30% od ukupnog broja parkiranih vozila

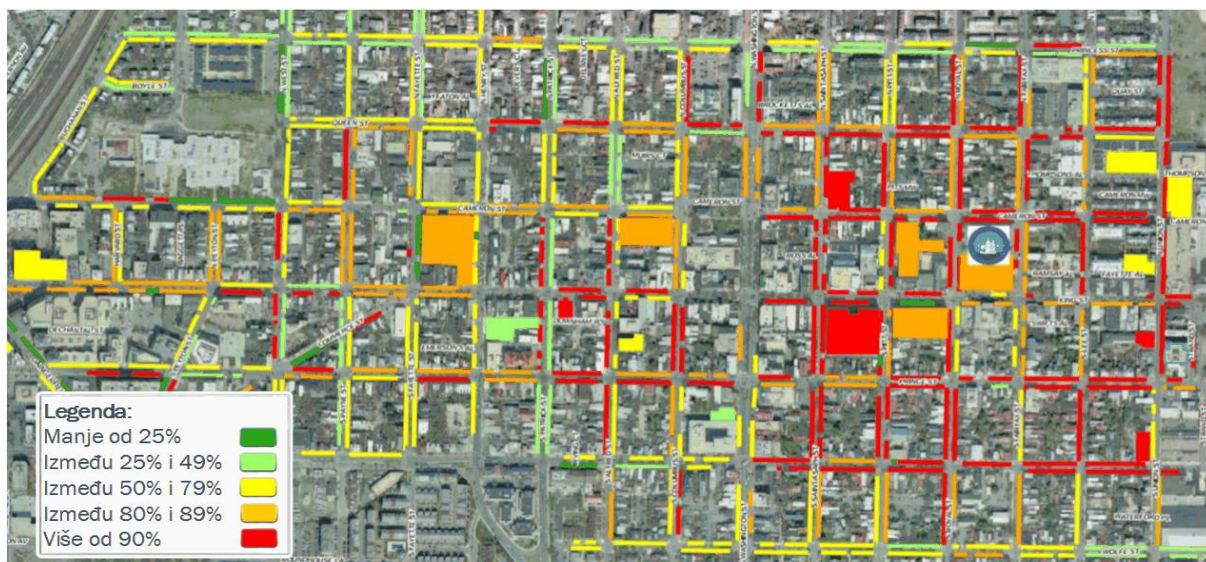
- ParkCast [69] je naziv za rasprostiranje prometnih sadržaja grupiranjem parkiranih vozila. Parkirana vozila se prvo grupiraju u linijske nakupine vozila po ulicama. Nakupine vozila imaju vozila predstavnike koji upravljaju s parkiranim vozilima i njihovima resursima te organiziraju rasprostiranje prometnog sadržaja. Simulacijski rezultati pokazuju da ParkCast značajno smanjuje kašnjenja do skoro 100 puta u okolinama s rijetkim prometom i 20 puta u okolinama s gustim prometom, povećava brzinu preuzimanja (engl. *download*) poruka s velikim sadržajima, ubrzava rasprostranjivanje malih poruka posebno u uvjetima male gustoće prometa te osigurava najnovije informacije. U radu je predloženo i korištenje dodatnih baterija za rad s uređajima OBU. U predloženom modelu učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju proučen je kapacitet akumulatora i potrošnja OBU uređaja te je zaključeno da nisu potrebne dodatne baterije za napajanje OBU uređaja
- u [66] autori predlažu korištenje parkiranih vozila kao prijenosne čvorove za povezivanje dvaju vozila između koji se nalazi zgrada ili neka druga prepreka zbog čega nisu u komunikacijskom dometu. Koriste parkirana vozila kako bi periodno slali poruke CA (engl. *Cooperative Awareness*) koje sadrže informacije o poziciji i brzini vozila. CA poruke koriste vozila u blizini kako bi dobili informaciju o prisutnosti drugih vozila. CA poruke se šalju samo u dva skoka. U radu je prikazano da je korištenje parkiranih vozila ključno u podršci sigurnosnim aplikacijama. Vrednuju vlastitu ideju sintetičkom simulacijom korištenjem scenarija Manhattan mreže i stvarnog prigradskog područja. Zaključuju da se s korištenjem parkiranih vozila poboljšava rasprostiranje poruka CA za 40% što posljedično povećava prometnu sigurnost. U modelu učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju sva su testiranja provedena na simulaciji stvarnog gradskog područja te je za komunikaciju korištena kombinacija *beacon* i podatkovnih poruka
- u [70] autori predstavljaju sustav za preuzimanje sadržaja u ad-hoc mrežama vozila korištenjem parkiranih vozila. Predloženi je sustav kreiran za dijeljenje velikih dijelova podataka između vozila u 1-skok komunikaciji. Predlažu korištenje parkiranih vozila umjesto infrastrukture kako bi se smanjila cijena implementacije ad-hoc mreža vozila.

Sustav je vrednovan korištenjem karte grada Ingolstadt s 963 vozila u kretanju i 80 parkiranih vozila. Simulacijski rezultati pokazuju da predloženi sustav povećava svježinu sadržaja i učinkovitije koristi komunikacijske resurse. Preuzimanje sadržaja nije primarna funkcionalnost predloženog modela učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju, ali to može biti implementirano u budućem radu.

4.3. Studija parkiranja u naseljenim područjima

Za detaljno proučavanje parkiranja u naseljenim gradskim područjima odabrano je iscrpno istraživanje provedena u Old Town Alexandriji [71]. Proučavano područje sastoji se od 85 gradskih blokova s 8332 javna parkirna mjesta. Klasično parkiranje na ulici sadrži najviše parkirnih mjesta, ukupno 53% u odnosu na cijelo područje, javne garaže sadržavaju 42% parkirnih mjesta, a izdvojene površine za parkiranje 5%. Studija brojanja zauzetih parkirnih mjesta provedena je u šest različitih vremenskih perioda tijekom radnog dana i vikenda. Na slici 4.2 preuzetoj iz [71] prikazano je zauzeće parkirnih mjesta tijekom popodneva radnog dana. Iz proučavanja kompletne studije parkiranja izvedene su sljedeće činjenice:

- parkirna mjesta su pravilno i učinkovito raspodijeljena
- parkiranje je pretežno na obje strane ulice
- prosječno ukupno korištenje parkirnih mjesta na ulici je od 61% tijekom večeri radnog dana do čak 76% tijekom petka navečer
- prosječno ukupno korištenje parkirnih mjesta na posebnim parkirnim površinama je od 41% tijekom večeri radnog dana do čak 86% tijekom petka popodne
- prosječno ukupno korištenje parkirnih mjesta u garažama je od 29% tijekom subote popodne do 78% tijekom popodneva radnog dana
- prosječno više od 5000 parkiranih vozila nalazi se na području 1600x800 m
- nisu brojana privatna parkirna mjesta i vozila smještena izvan službenih parkirališta što znači da je broj stvarnih parkiranih vozila još i veći
- veći broj zauzetih parkirnih mjesta je u blizini važnih mjesta u gradu što znači da će na tim mjestima biti i bolja pokrivenost ad-hc mreže vozila i komunikacijska povezanost vozila
- veći broj parkirnih mjesta je u blizini većih zgrada što je prednost jer veće zgrade jače blokiraju komunikacijski signal i značajno smanjuju komunikacijski domet pa će parkirana vozila poslužiti za rješavanje ovog problema.



Slika 4.2. Prikaz zauzetosti parkirnih mjesta tijekom popodneva radnog dana u Old Town Alexandria [71]

Na temelju ovih činjenica može se zaključiti da u naseljenim gradskim područjima postoji veliki broj parkiranih vozila tijekom cijelog dana i kroz cijeli tjedan što je dobar preduvjet za konstantno korištenje parkiranih vozila za učinkovitiju komunikaciju u ad-hoc mreži vozila. Problem koji se pojavljuje u korištenju parkiranih vozila za učinkovitiju komunikaciju u ad-hoc mrežama vozila je društvene, a ne tehničke prirode. Naime, parkirano vozilo ipak nema neograničeni izvor napajanja jer su vozila ugašena i za rad uređaja OBU koriste se akumulatori u vozilima. Postavlja se pitanje kako motivirati korisnike da dozvole korištenje akumulatora nakon što ugase svoje vozilo. Postoji nekoliko razloga zbog kojih bi vozači mogli dozvoliti korištenje njihovih vozila za komunikaciju u ad-hoc mrežama i kada su ugašena. Korištenje parkiranih vozila dokazano poboljšava sigurnost na cesti što znači da će i njihova sigurnost biti veća kada se voze u vozilu. Nadalje, korištenje društvenih mreža, dijeljenja računalnih resursa između korisnika i općenitog pozitivnog pristupa prema zajednici otvorenog izvornog koda su pokazatelji da društvo želi dijeliti informacije i resurse za veće dobro iako trenutno od toga nema izravne koristi.

4.4. Karakteristike akumulatora u vozilima

Korištenje parkiranih vozila podrazumijeva i korištenje njihovih akumulatora. Model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju ne smije dopustiti da se akumulatori potpuno isprazne jer će to dovesti do nezadovoljstva vozača. Zbog toga je napravljen proračun potrošnje uređaja OBU u odnosu na kapacitet akumulatora. U [72] autori

su testirali vezu između prijenosne snage i primitka paketa za V2V sigurnosni komunikacijski sustav u sljedećim uvjetima:

- DSRC na 5.9 GHz
- veličina paketa 400 bajta
- brzina prijenosa: 3 Mbps i 6 Mbps.

Zaključili su da je tipična potrošnja uređaja OBU (DC 12 V, 0.5 A) oko 2 W za komunikaciju i 4 W za rad. Budući da tipični akumulator za srednju i jaču klasu vozila ima kapacitet 80 Ah i radi na 12 V, može se izračunati vrijeme nakon kojeg će OBU isprazniti akumulator prema izrazu (4-1):

$$\frac{80Ah * 12V}{2.0W + 4.0W} = 160h \approx 6.5dana \quad (4-1)$$

Iz dobivenog se rezultata može vidjeti da se u prosjeku parkirana vozila mogu koristiti 6.5 dana dok im se akumulator u potpunosti ne isprazni i stoga vlasnici vozila nemaju razloga za brigu. Moguće je ugraditi i sigurnosne mehanizme koji će isključiti vozila iz komunikacije nakon što im se akumulator isprazni za određeni postotak kapaciteta. Kada bi ograničenje bilo i samo 5% ukupnog kapaciteta akumulatora, parkirano bi vozilo moglo u prosjeku sudjelovati 8 sati u komunikaciji što predstavlja značajno vrijeme s kojim bi se dobio značajan broj parkiranih vozila koji sudjeluju u komunikaciji. Također, može se implementirati mehanizam buđenja (engl. *wake-up*) koji bi uključivao parkirana vozila u komunikaciju po potrebi, a ne cijelo vrijeme. Veća (kamioni, autobusi i sl.) i hibridna vozila imaju značajno veće vrijeme korištenja OBU uređaja kada su parkirana zbog znatno većeg kapaciteta akumulatora. Npr. akumulator Tesla Roadstera ima kapacitet 53000 Wh što daje dovoljno energije za nekoliko godina konstantnog korištenja uređaja OBU. Iz svega se navedenog može zaključiti da nije potrebno koristiti dodatne baterije u vozilima kako bi se omogućila njihova komunikacija i kada su parkirana jer je prosječni kapaciteta akumulatora u vozilima dovoljan da zadovolji potrebe OBU uređaja i omogući njihovo korištenje duži vremenski period tijekom jednog dana.

4.5. Primjena modela za učinkovito rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju

V2PV model komunikacije predstavlja kombinaciju V2V i V2I modela komunikacije. Iako su parkirana vozila po dinamici statična, nisu potpuno stabilne cestovne jedinice i nisu sva

međusobno povezana izravnom vezom nego sudjeluju u V2V komunikaciji kao ravnopravni, ali statični čvorovi. To je njihova velika prednost jer je ad-hoc mreža vozila karakterizirana kao jako dinamična mreža s puno prekida komunikacije i dijeljenja mreže. V2PV model komunikacije koristi parkirana vozila uz ceste kao prijenosne čvorove koji potpomažu komunikaciju kod malih gustoća prometa. Ona ne mogu u potpunosti zamijeniti cestovnu infrastrukturu, no ipak mogu poslužiti kao privremena zamjena ili podrška infrastrukturi. Sljedeće karakteristike parkiranih vozila daju razloge za njihovo korištenje:

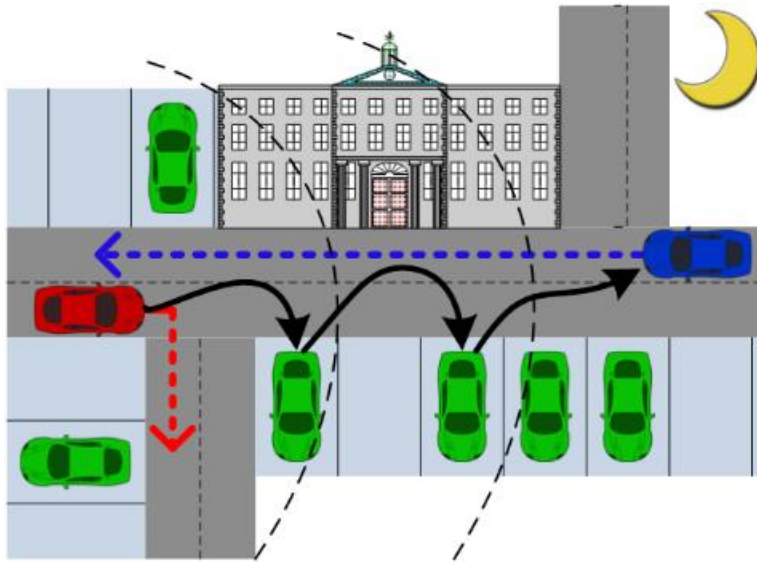
- predstavljaju statične čvorove u V2V komunikaciji
- u bilo kojem trenutku postoji veliki broj parkiranih vozila
- dugotrajno borave na istom mjestu
- široko su raspodijeljena kroz mrežu
- nalaze se na točno određenim i predvidivim lokacijama.

U slučaju male gustoće prometa mogu se primijeniti V2I i SCF komunikacijski modeli kako bi rasprostiranje poruka bilo učinkovitije, no oba komunikacijska modela imaju nedostatke. V2I oblik komunikacije daje vrlo mala kašnjenja, ali zahtijeva infrastrukturu čija su implementacija i održavanje skupi i dugotrajni te ju kontroliraju operateri, a SCF oblik komunikacije ne treba infrastrukturu, ali se zbog pohranjivanja i prenošenja poruka značajno povećava vrijeme kašnjenja. Zbog činjenice da su vozila u prosjeku parkirana više od 23 sata na dan (preko 95% ukupnog vremena), potrebno ih je iskoristiti za komunikaciju i kada nisu u pokretu. Ove karakteristike omogućuju da se parkirana vozila uključe u komunikaciju, omoguće bolju optimizaciju i bolje korištenje resursa od vozila koja su u pokretu, nisku cijenu implementacije i mogućnost nadomjeska infrastrukture do neke mjere. U dosadašnjem radu [66], [67], [69] i [70] autori su dokazali da korištenje parkiranih vozila u komunikaciji može poboljšati trajanje i razmjer povezivanja, smanjiti vrijeme nepovezanosti, smanjiti kašnjenje i povećati brzinu prenošenja velikog sadržaja, ubrzati rasprostiranje malih poruka, povećati svježinu sadržaja i bolje iskoristiti resurse za komunikaciju.

U ovom je doprinosu predloženo korištenje parkiranih vozila za učinkovitiju komunikaciju u sljedećih pet scenarija koji su nastali prema vlastitim zapažanjima ili prema literaturi:

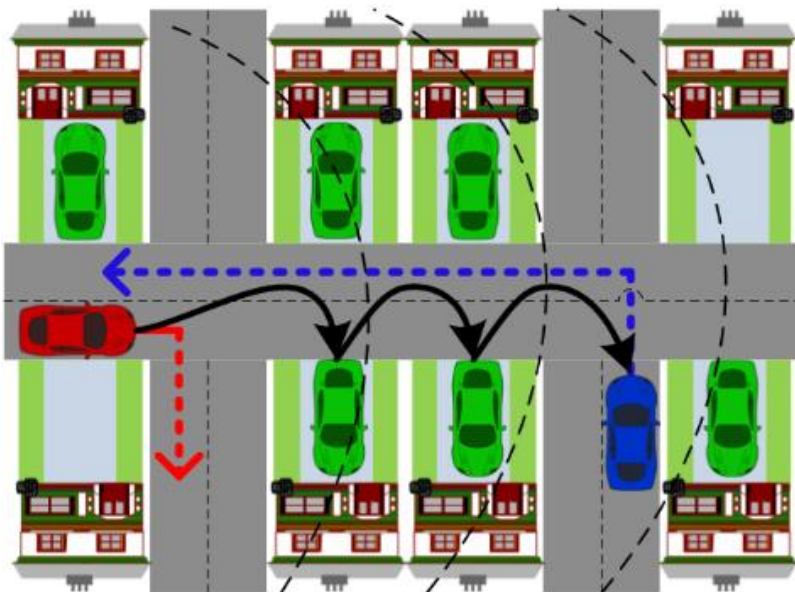
- **Scenarij 1:** tijekom noći i za vrijeme rijetkog prometa na cestama (slika 4.3): gustoća prometa je vrlo mala i većina vozila su parkirana. Vozila koja se kreću po cestama imaju mali broj susjeda ili ih uopće nemaju i ona vozila koja im nisu u komunikacijskom dometu ni nakon višestrukih skokova, bit će u mogućnosti razmijeniti poruke samo ako se susretu korištenjem SCF modela komunikacije. To će dovesti do velikih kašnjenja

u dostavljanju poruka. Ako se vozila ne susretnu, neće biti u mogućnosti razmijeniti poruke. Parkirana vozila omogućuju prenošenje poruka između pokretnih vozila koja nisu u komunikacijskom dometu s puno manjim kašnjenjima od SCF modela komunikacije te povećavaju pokrivenost mreže jer dostavljaju poruke vozilima koja ih inače ne bi primila.



Slika 4.3. Scenarij 1: Prikaz prometa tijekom noći i za vrijeme male gustoće

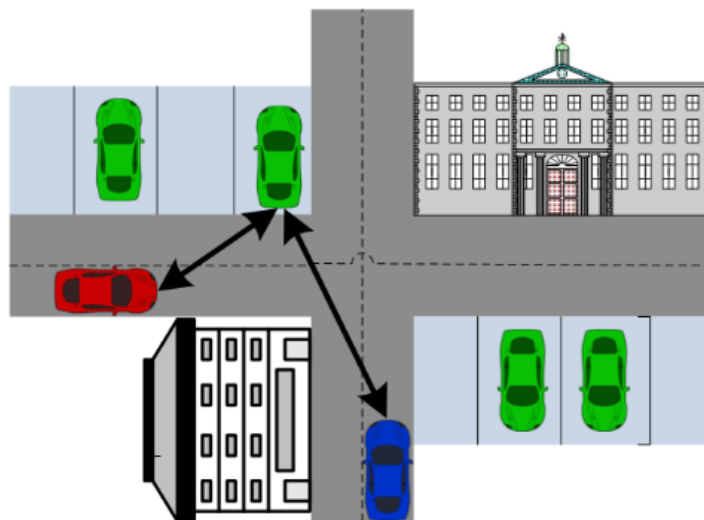
- **Scenarij 2:** u prigradskim područjima (slika 4.4):



Slika 4.4. Scenarij 2: Prikaz prometa u prigradskim područjima

najčešće se sastoje od cesta male gustoće prometa i većina je vozila parkirana ispred kuća. U ovom je scenariju gustoća vozila mala tijekom cijeloga dana jer u prigradskim naseljima obično živi značajno manji broj ljudi nego na istoj površini u gradskim područjima i zemljišta na kojima se nalaze kuće su većinom velike površine. Parkirana vozila mogu biti iskorištena za smanjivanje kašnjenja u dostavljanju poruka i povećanje pokrivenosti u mreži kao što je opisano u Scenariju 1.

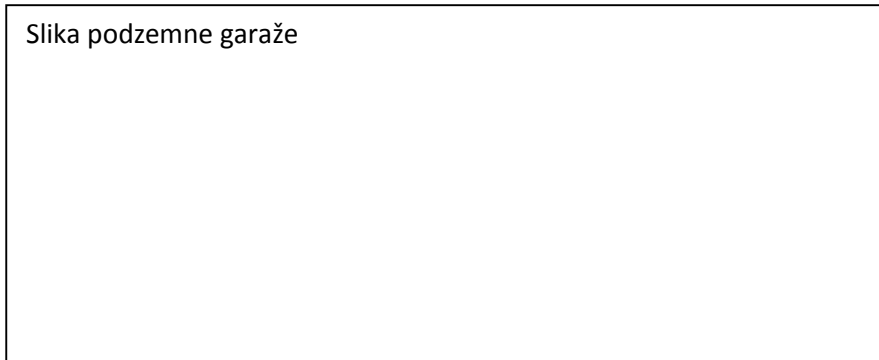
- **Scenarij 3:** za zaobilazanje prepreka i gradskih blokova, kao što je opisano u [66] (slika 4.5): prepreke i građevine značajno ometaju komunikaciju i ukoliko se između vozila na cesti koja su vrlo blizu nalazi neka veća prepreka, postoji velika mogućnost da će ona blokirati signal i vozila neće moći međusobno komunicirati. Stoga se parkirana vozila mogu iskoristiti kako bi se prepreke zaobišle i kako bi se omogućila bolja povezanost vozila u okolinama s velikim i brojnim građevinama ili gradskim blokovima.



Slika 4.5. Scenarij 3: Prikaz blokiranja signala zbog prepreka u gradskim okolinama

- **Scenarij 4:** nakon početne primjene ad-hoc mreža vozila: kao što je opisano u [73] nakon početne primjene ad-hoc mreža vozila proći će oko 15 godina prije nego velika većina vozila bude opremljena s komunikacijskim sposobnostima. U početku će broj vozila koja posjeduju uređaje OBU i koja sudjeluju u komunikaciji u ad-hoc mrežama vozila biti mali, a promet će takvih vozila biti konstantno male gustoće.
- **Scenarij 5:** u podzemnim garažama (slika 4.6): vozila u podzemnim garažama ne mogu komunicirati s vozilima na ulici zbog prekida mreže. Ako parkirana vozila u podzemnim garažama imaju upaljene uređaje OBU, vozilo koje ulazi u podzemnu

garažu moći će proslijediti im najnovije informacije koje je prikupilo u vožnji. Tako će vozači čim sjednu u svoje vozilo i prije paljenja vozila imati najnovije informacije o trenutnom stanju u prometu na cestama i moći će donijeti informirane odluke o budućoj vožnji. Također, vozila koja ulaze u podzemnu garažu moći će primiti korisne informacije s parkiranih vozila (npr. o slobodnim parkirnim mjestima).



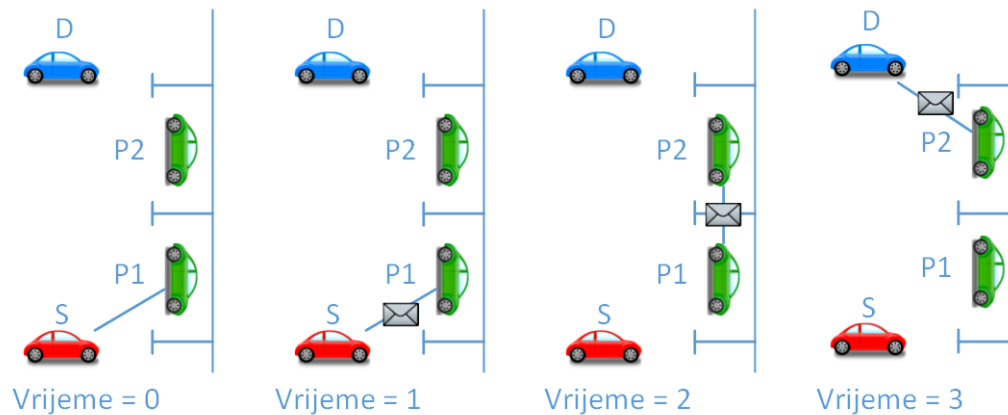
Slika 4.6. Prikaz podzemne garaže u kojoj je blokiran signal s ceste

4.6. Opis V2PV modela komunikacije

Na slici 4.7 prikazan je princip rada modela učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju. U vremenu 0 prikazan je scenarij s rijetkim prometom gdje su vozila S i D izvan komunikacijskog dometa i nisu u mogućnosti razmijeniti poruke. Između njih se nalaze parkirana vozila $P1$ i $P2$ koja su međusobno u komunikacijskom dometu. Vozilo $P1$ je u komunikacijskom dometu vozila S , a vozilo $P2$ u komunikacijskom dometu vozila D . U vremenu 1 vozilo S razošilja poruku koju prima vozilo $P1$. U vremenu 2 vozilo $P1$ razošilja poruku i tada ju prima vozilo $P2$. U vremenu 3 vozilo $P2$ razošilja poruku i vozilo D ju prima. Dakle, korištenjem parkiranih vozila poruka je ipak dostavljena od vozila S do vozila D . Karakteristike V2PV modela komunikacije su:

- veliki stupanj vremenske i prostorne pravilnosti
- veća optimizacija i bolje korištenje resursa
- poboljšanje komunikacije u gradskim područjima s rijetkim prometom i preprekama
- niži troškovi implementacije ad-hoc mreža vozila
- mogućnost zamjene infrastrukture
- u kombinaciji s V2V i SCF modelima komunikacije ima potencijal omogućiti punu pokrivenost u okolinama s rijetkim prometom

- jedini je problem motivacija korisnika koja bi trebala dopustiti korištenje OBU uređaja dok su vozila ugašena.



Slika 4.7. Model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju

Implementacija V2PV modela na autocestama ili brzim cestama izvan naselja nije poželjna jer u takvim okolinama postoji mali broj parkiranih vozila koja su najčešće vrlo daleko jedna od drugih i nisu u komunikacijskom dometu. Može se zaključiti da V2PV model komunikacije ne omogućuje učinkovitije rasprostiranje poruka u takvim okolinama.

4.6.1. Metoda prepoznavanja Scenarija 1, 2 i 4

Scenarij 1, 2 i 4 imaju zajedničke karakteristike, tj. na cestama je rijedak promet i vrlo je mali broj vozila u pokretu, a puno je veći broj parkiranih vozila. Gustoća vozila u pokretu ρ_v na duljini nekog dijela ceste L s ukupnim brojem vozila u pokretu N_v može se prikazati prema izrazu (4-2):

$$\rho_v = \frac{N_v}{L} \quad (4-2)$$

Gustoća parkiranih vozila ρ_p na dužini nekog dijela ceste L s ukupnim brojem parkiranih vozila N_p računa se prema izrazu (4-3):

$$\rho_p = \frac{N_p}{L} \quad (4-3)$$

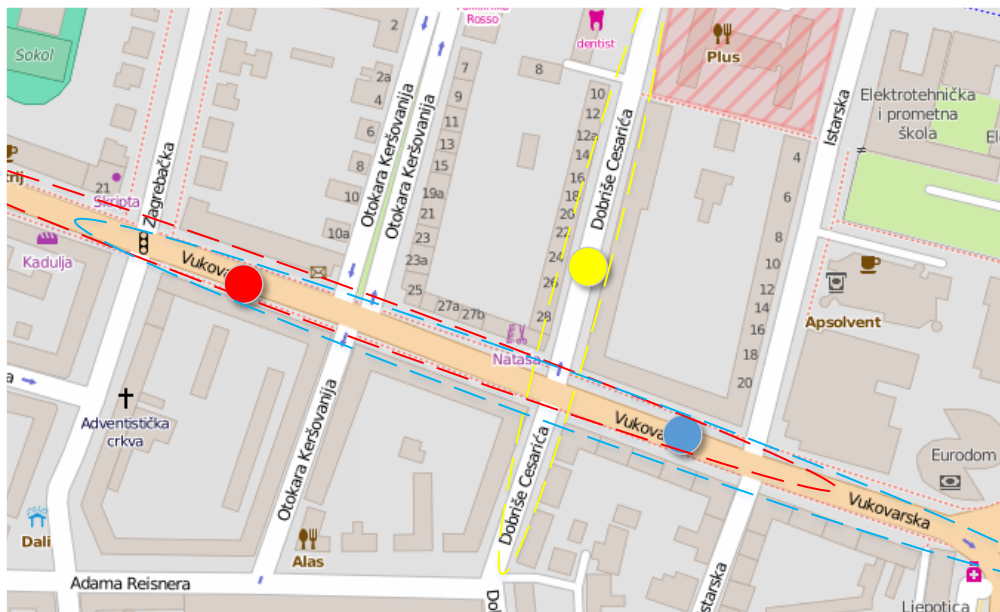
Funkcija za prepoznavanje Scenarija 1, 2 i 4 koja odlučuje o korištenju parkiranih vozila za podršku u komunikaciji za učinkovito rasprostiranje poruka na dužini nekog dijela ceste L prikazana je u izrazu (4-4):

$$p_L = \begin{cases} 1 & \rho_p > 2 \times \rho_v \\ \frac{\rho_v}{\rho_p} & \rho_v \leq \rho_p \leq 2 \times \rho_v \\ 0 & \rho_p < \rho_v \end{cases} \quad (4-4)$$

Ako je gustoća parkiranih vozila ρ_p na nekom dijelu ceste L dva puta veća od gustoće vozila u pokretu ρ_v , parkirana će vozila sudjelovati u komunikaciji i prenositi će poruke primljene s vozila u pokretu. Ako je gustoća parkiranih vozila veća od gustoće vozila u pokretu, ali manja od dvostruke gustoće vozila u pokretu, parkirana će vozila sudjelovati u komunikaciji s vjerojatnošću vjerojatnosti ρ_v/ρ_p . Ako je pak gustoća parkiranih vozila manja od gustoće vozila u pokretu, parkirana vozila neće sudjelovati u komunikaciji jer se smatra da je na cesti dovoljan broj vozila i da nije potrebno trošiti kapacitet akumulatora na parkiranim vozilima.

4.6.2. Metoda prepoznavanja Scenarija 3

Karakteristike Scenarija 3 su da se vozila nalaze u gusto naseljenim gradskim područjima, da su ulice većinom uske i da se na obje strane nalaze visoke zgrade ili gradski blokovi koji ometaju komunikaciju između vozila. Može se pretpostaviti je da će vozila imati veliki domet signala samo po jednoj osi, tj. po cesti po kojoj se kreću. Po poprečnoj osi domet signala bit će vrlo mali jer će ga ometati zgrade ili neke druge prepreke kao što je prikazano na slici 4.8. Može se zaključiti da je u Scenariju 3 domet signala u obliku elipse te da korištenje parkiranih vozila može pomoći da se značajno poveća komunikacijski domet, pogotovo po poprečnoj osi (slika 4.9). Algoritam za prepoznavanje Scenarija 3 i uključivanje parkiranih vozila u komunikaciju prikazan je u algoritmu 4.1. Prvo se pronalazi najudaljeniji susjed od nekog čvora i zatim se pronalazi susjed koji je suprotan tom najudaljenijem čvoru. Kroz ta dva susjeda prolazi glavna os po kojoj čvor ima najdalji domet. Tada se traži sredina te osi i gleda se koliko su udaljeni susjedi od sredine koji su okomiti na nju. Nakon toga se računaju a i b polumjeri elipse i ako je $a > 2*b$, znači da je Scenarij 3 aktivan i počinju se koristiti i parkirana vozila za učinkovitiju komunikaciju u ad-hoc mrežama vozila.



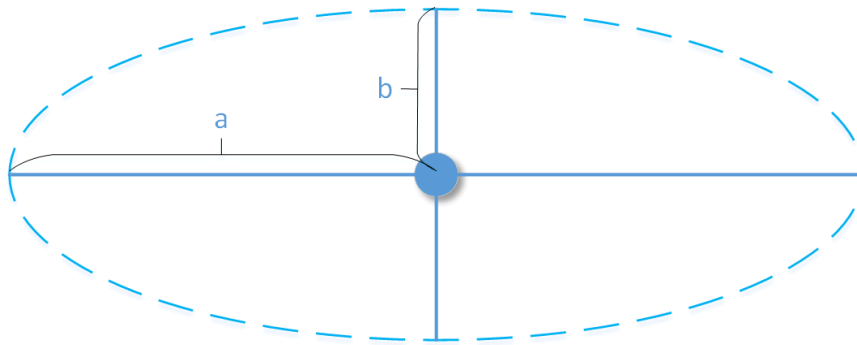
Slika 4.8. Domet signala komunikacije u Scenariju 3

Algoritam 4.1. Algoritam za prepoznavanje Scenarija 3 i uključivanje parkiranih vozila u komunikaciju

```

1: Za (i=0;i<NSS;i++)
2:   Ako je čvori.udaljenost>max_udaljenost
3:     max_udaljenost=čvori.udaljenost
4:     max_čvor=čvor.ID
5: Za (i=0;i<NSS;i++)
6:   Ako je čvori.x&&čvori.y SUPROTAN max_čvor.x&&max_čvor.y
7:     suprotan_čvor1.x=max_čvor.x && suprotan_čvor1.y=max_čvor.y
8:   sredina.x= max_čvor.x-suprotan_čvor1.x
9:   sredina.y= max_čvor.y-suprotan_čvor1.y
10: Za (i=0;i<NSS;i++)
11:   Ako je čvori.x&&čvori.y SUPROTAN_IZNAD_I_OKOMIT_NA
12:     sredina.x&&sredina.y
13:     suprotan_čvor2.x=čvori.x && suprotan_čvor2.y=čvori.y
14:   Ako je čvori.x&&čvori.y SUPROTAN_ISPOD_I_OKOMIT_NA
15:     sredina.x&&sredina.y
16:     suprotan_čvor3.x=čvori.x && suprotan_čvor3.y=čvori.y
17: Izračunaj a i b
18: Ako je a>2*b
19:   Scenarij_3 = Aktivan
20:   Koristi parkirana vozila

```



Slika 4.9. Prikaz dometa signala u obliku elipse u Scenariju 3

4.6.3. Metoda prepoznavanja Scenarija 5

Postoji nekoliko načina kako se može prepoznati Scenarij 5 te uključiti parkirana vozila u komunikaciju. Scenarij 5 obuhvaća podzemne garaže kojima je glavna karakteristika da je broj parkiranih vozila uvijek puno veći od broja vozila u pokretu i stoga se može postaviti uvjet kao u izrazu (4-5):

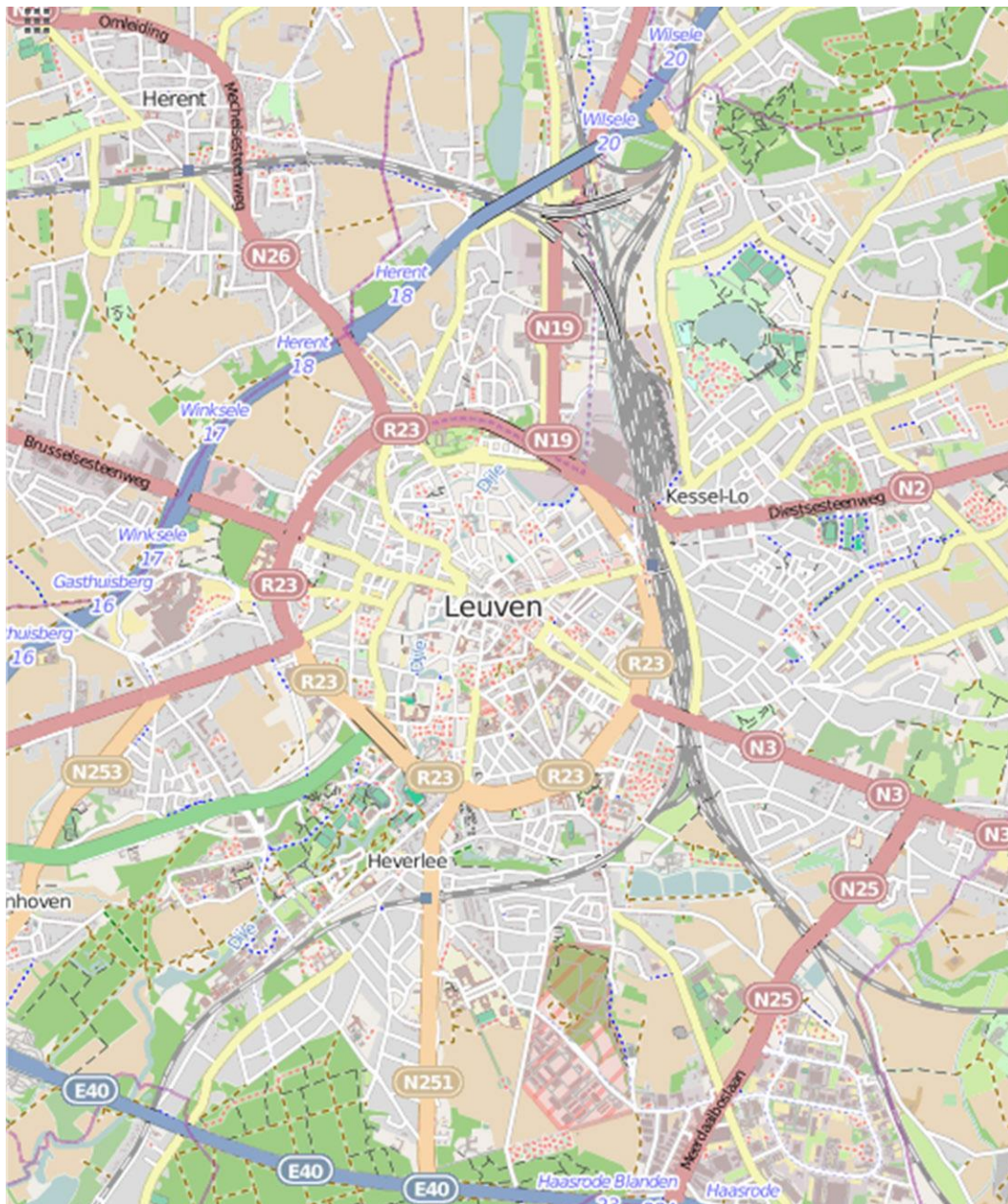
$$\begin{aligned} \text{Ako je } \rho_p > \alpha \times \rho_v \\ \text{Scenarij_5} = \text{Aktivan} \end{aligned} \quad (4-5)$$

Vrijednost faktora α ovisi o tipu i veličini podzemne garaže, no moguće ga je modelirati da bude univerzalan za sve garaže. Prepoznavanje Scenarija 5 moguće je riješiti i korištenjem infrastrukture tako da se postavi senzor na ulasku u podzemne garaže. Tada bi vozila pri ulasku dobila informaciju da se nalaze u podzemnoj garaži i nakon parkiranja bi OBU uređaj nastavio s radom.

4.7. Vrednovanje performansi modela za učinkovito rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju

Simulacije primjene modela za učinkovito rasprostiranje poruka korištenjem vozila u mirovanju provedene su korištenjem simulacijske okoline i postavki kao što je prikazano u tablici 3.1. Kao simulacijsko okruženje za kreiranje što realističnijih simulacija ad-hoc mreža vozila korišteni su Veins, Omnet++, SUMO i VACaMobil koji su opisani u poglavlju 3.6.2. Korišteni model kretanja vozila u simulacijama je Krauß model s parametrima definiranim u poglavlju 3.6.2. Prema studiji parkiranja provedenoj u Old Town Alexandriji, opisanoj u poglavlju 4.3, prosječno se više od 5000 parkiranih vozila nalazi na području 1600x800 m (1.28

km²) što daje gustoću od 3906.25 vozila po km². Korištena karta u simulacijama obuhvaća gusto naseljeno gradsko i rjeđe naseljeno prigradsko područje te je prikazana na slici 4.10.



Slika 4.10. Karta grada Leuvena (Belgija) korištena u simulacijama u disertaciji

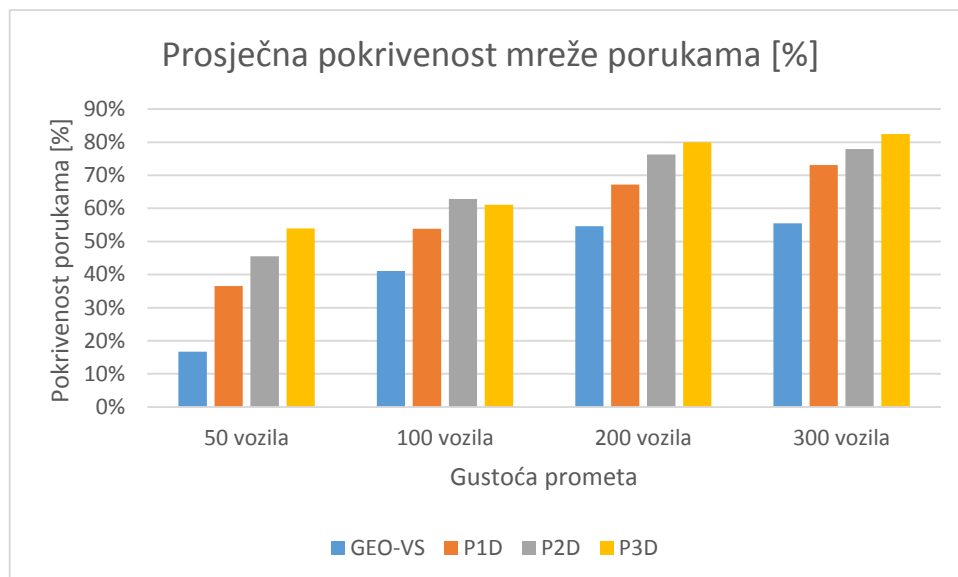
Podaci o broju parkirnih mjesta korištene karte grada Leuvena nisu dostupni, a izračunom na temelju studije parkiranja opisane u poglavlju 4.3 s prosječnom gustoćom od 3906.25 parkiranih vozila po km², na površini karte grada Leuvena od 42 km² dobije se prevelik i nerealan prosječan broj parkiranih vozila. Stoga je procijenjeno da je prosječan broj parkiranih vozila na karti između 5000 i 10000. Simulacijama se želi dokazati da se korištenjem malog broja parkiranih vozila od ukupnog broja parkiranih vozila može povećati pokrivenost mreže i

domet dostavljanja poruka te smanjiti kašnjenja. Stoga su korištene tri različite gustoće vozila u mirovanju na karti: P1D - 500 (5-10% od ukupnog broja parkiranih vozila), P2D - 1000 (10-20% od ukupnog broja parkiranih vozila) i P3D - 1500 (15-30% od ukupnog broja parkiranih vozila). Vozila u mirovanju smještena su na kartu korištenjem algoritma VACaMobil za slučajno smještanje objekata na kartu kao što je opisano u [23]. Algoritam osigurava da vozila u mirovanju ne budu smještena unutar zgrada ili ostalih neprometnih površina poput rijeka, jezera, željezničkih pruga i sl. i tako izgube snagu i domet signala te da ne budu potpuno iskorištena u komunikaciji. Vozila u mirovanju smještena su na cestama, ali ne ometaju promet. Budući da je prvenstvena primjena modela u okolinama s rijetkim prometom na cestama, u simulacijama su korištene četiri različite gustoće prometa na cestama kako bi se vrednovala učinkovitost u situacijama s vrlo rijetkim i rijetkim prometom na cestama. Korištene gustoće cestovnog prometa na karti su: 50, 100, 200 i 300 vozila. Ukupno trajanje pojedine simulacije je 300 s. Komunikacijski protokoli koji se koriste u simulacijama su standardni protokoli za ad-hoc mreže vozila, IEEE 802.11p i IEEE 1609.4 DSRC/WAVE koji rade na 5.9 GHz uz maksimalni komunikacijski domet od 1000 m.

Učinkovitost modela rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju dokazuje se uspoređivanjem simulacijskih rezultata upotrebe predloženog modela u četiri navedene gustoće s rijetkim prometom na cestama (50, 100, 200 i 300 vozila na karti) u istim uvjetima. U svakoj se gustoći koriste tri različite gustoće parkiranih vozila na karti (P1D, P2D i P3D) koje se uspoređuju s rezultatima primjene GEO-VS algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila koji koristi kombinaciju V2V i SCF modela komunikacije i koji je opisan u poglavlju 3. U nastavku su detaljno opisana korištena mjerila vrednovanja, prikazani su rezultati mjerenja dobiveni simulacijama te je iznesena diskusija i usporedba rezultata mjerenja performansi.

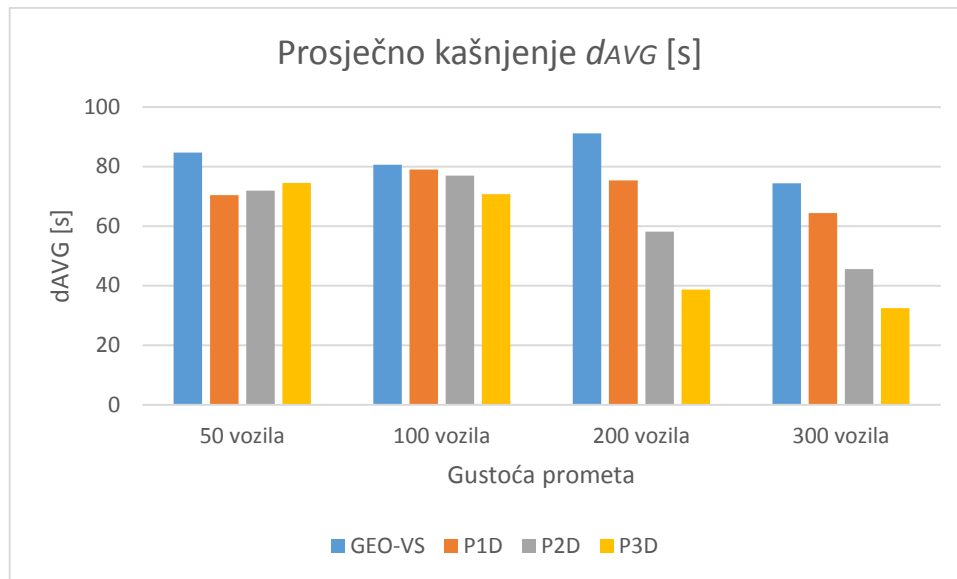
Prosječna pokrivenost mreže porukama pokazuje prosječni postotak vozila do kojih su došle podatkovne poruke u odnosu na ukupan broj vozila u pokretu na karti. Neke poruke su generirane u početku simulacije i u povezanijem dijelu mreže pa će biti dostavljene gotovo svim vozilima u mreži, a neke su poruke generirane tek na kraju simulacije ili u nepovezanim dijelovima mreže i bit će dostavljene vrlo malom broju vozila. U izrazu (3-3) prikazana je formula za izračun prosječne pokrivenosti mreže porukama. Na slici 4.11 prikazana je usporedba simulacijskih rezultata prosječne pokrivenosti mreže porukama modela učinkovitog rasprostiranja poruka prilikom korištenja triju različitih gustoća vozila u mirovanju (P1D, P2D i P3D) i GEO-VS algoritma za četiri različite prosječne gustoće prometa na cestama (50, 100, 200 i 300 vozila na karti). Prilikom korištenja samo 500 vozila u mirovanju (P1D) rezultati

pokazuju da je ostvarena značajno veća prosječna pokrivenost mreže porukama za sve četiri gustoće prometa na cestama. Korištenjem većeg broja vozila u mirovanju (P2D 1000 i P3D 1500) ostvareno je gotovo linearno povećanje u prosječnoj pokrivenosti mreže porukama. Najveća pokrivenost mreže porukama od 82.52% ostvarena je u gustoći prometa od 300 vozila na cestama prilikom korištenja P3D gustoće parkiranih vozila. Budući da su neke poruke generirane pri kraju simulacije ili na rubovima karte u nepovezanim dijelovima mreže s vrlo malim brojem vozila, značajno smanjuju ukupnu pokrivenost mreže porukama i stoga ona nije stopostotna. Može se zaključiti da vozila u mirovanju omogućuju da podatkovne poruke dođu do puno većeg broja vozila u pokretu i tako značajno povećavaju prosječnu pokrivenost mreže porukama.



Slika 4.11. Usporedba prosječnih pokrivenosti mreže porukama P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma

Prosječno kašnjenje u dostavljanju poruka u mreži pokazuje prosječnu količinu proteklog vremena između trenutka generiranja nekog događaja u vozilu i slanja te poruke na ostalim vozilima. Računa se tako da se prvo izračuna zbroj kašnjenja pojedine poruke na svim čvorovima na kojima je primljena kao što je prikazano u izrazu (3-1). Zatim se zbrajaju sva kašnjenja svih poruka u mreži koja u omjeru s ukupnim brojem svih čvorova koji su primili poruke čini prosječno kašnjenje dostave poruka kao što je prikazano u izrazu (3-2). Na slici 4.12 prikazani su rezultati usporedbe prosječnog kašnjenja u dostavljanju poruka P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma.

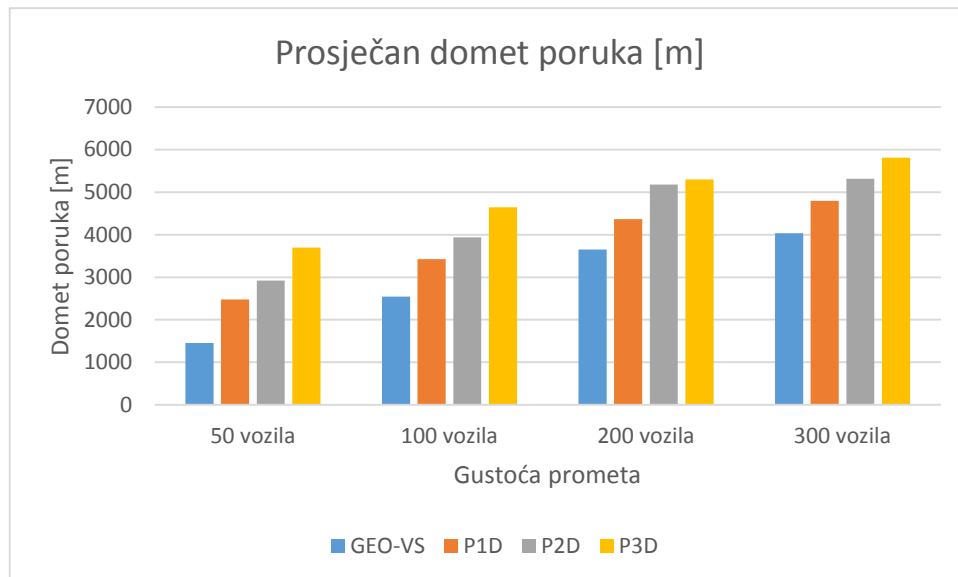


Slika 4.12. Usporedba prosječnih kašnjenja u dostavljanju poruka P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma

Za sve četiri prosječne gustoće prometa model učinkovitog rasprostiranja poruka daje značajno manja kašnjenja u dostavljanju poruka u odnosu na GEO-VS algoritam bez korištenja vozila u mirovanju. Najveće smanjenje kašnjenja postignuto je u gustoćama prometa s 200 i 300 vozila na karti. U gustoći prometa s 200 vozila na karti prosječno kašnjenja u dostavljanju poruka prilikom korištenja GEO-VS algoritma iznosi 91.13 s. Uključivanjem 500 vozila u mirovanju u komunikaciju kašnjenje je smanjeno na 75.29 s, uključivanjem 1000 vozila u mirovanju kašnjenje je smanjeno na 58.12 s, a uključivanjem 1500 vozila u mirovanju prosječno kašnjenje u dostavljanju poruka smanjeno je na samo 38.72 s. Za gustoću prometa od 300 vozila prosječno kašnjenje u dostavljanju poruka smanjeno je sa 74.37 s redom na 64.38 s, 45.57 s i 32.41 s. Može se zaključiti da korištenje vozila u mirovanju osigurava puno brže rasprostiranje poruka kroz mrežu što rezultira značajno manjim prosječnim kašnjenjem u dostavljanju poruka, pogotovo u okolinama u kojima promet nije jako rijedak.

Prosječan domet poruka prikazan u izrazu (3-10), pokazuje kolika je prosječna maksimalna euklidska udaljenost poruke od mjesta na kojemu je poruka nastala do krajnjih vozila do kojih je poruka stigla. Na slici 4.13 prikazana je usporedba prosječnih dometa poruka P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma. Kao što se može vidjeti za sve četiri gustoće prometa na cestama prosječan domet poruka modela učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem P1D, P2D i P3D gustoća vozila u mirovanju raste gotovo linearno. Najveće povećanje dometa poruka je u okolini s vrlo rijetkim prometom na cestama sa samo 50 vozila na cijeloj karti. U odnosu na GEO-VS P1D donosi povećanje

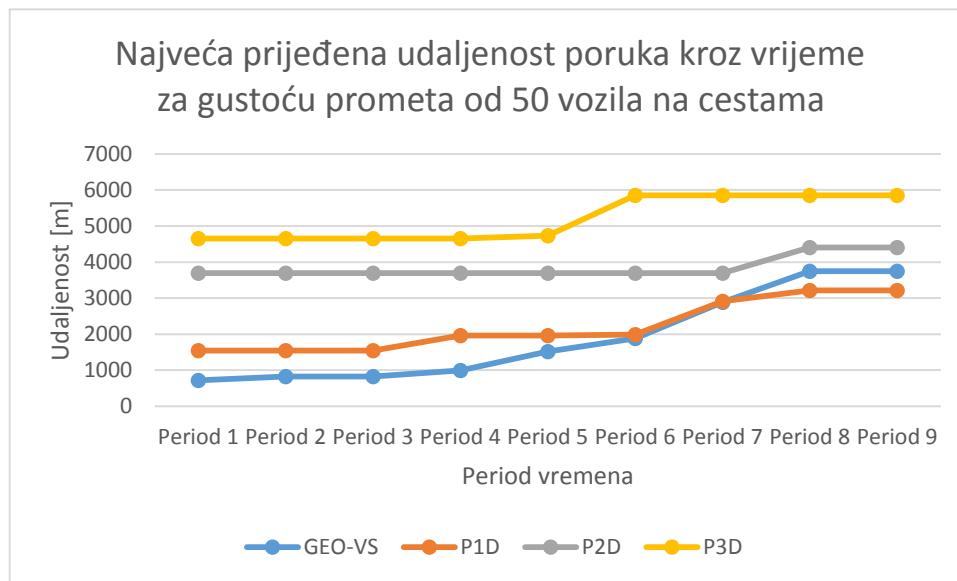
dometa od 70.65%, P2D 101.03%, a P3D čak 154.19%. S povećanjem gustoće prometa na cestama smanjuje se povećanje dometa poruka, no u usporedbi s GEO-VS algoritmom ostaje značajno veće. Može se zaključiti da korištenje vozila u mirovanju omogućava značajno veće širenje poruka od mjesta nastanka što posljedično rezultira i većom pokrivenošću mreže kao što je prikazano na slici 4.11.



Slika 4.13. Usporedba prosječnih dometa poruka P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma

Rasprostiranje poruka kroz vrijeme promatra se tako da se zabilježi najveća prijeđena udaljenost neke poruke na kraju svakog od devet perioda vremena, koji su prikazani na slici 3.33, za poruku koja je prevalila najveću udaljenost od izvora do nekog vozila. Na slici 4.14 prikazana je usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 50 vozila na cestama. U početnim periodima najveća prijeđena udaljenost poruke značajno je veća prilikom korištenja svih triju gustoća vozila u mirovanju što je posebno izraženo u P2D i P3D gdje je u prvim periodima najveća prijeđena udaljenost poruke konstantna i iznosi 3690.28 m i 4653.91 m u odnosu na GEO-VS gdje iznosi samo 720.80 m. Nakon Perioda 4 najveća prijeđena udaljenost poruka za GEO-VS algoritam značajno raste i ta se razlika u odnosu na P2D i P3D smanjuje, no još uvijek ostaje značajno veća. U zadnja 3 perioda najveća udaljenost poruka GEO-VS algoritma čak i prestiže najveću udaljenost poruka u P1D gustoći vozila u mirovanju. Može se zaključiti da P2D i P3D osiguravaju značajno veću udaljenost prijeđenih poruka kroz cijelo vrijeme simulacije, P1D daje jako dobre rezultate u početku

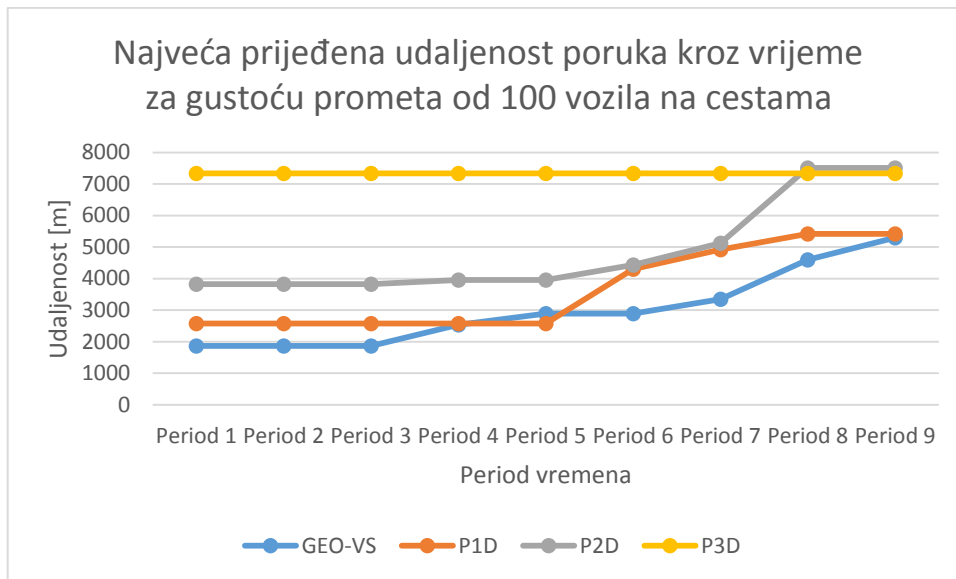
rasprostiranja poruka, a što vrijeme više prolazi njegova se prednost u odnosu na GEO-VS algoritam smanjuje.



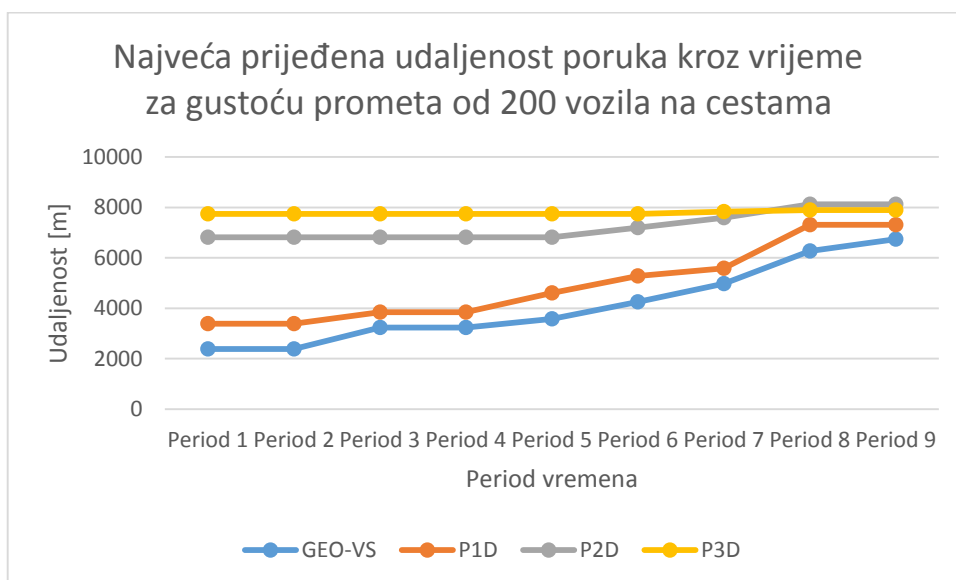
Slika 4.14. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 50 vozila na cestama

Na slici 4.15 prikazana je usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 100 vozila na cestama. Gustoća vozila u mirovanju P3D ima konstantnu najveću prijeđenu udaljenost poruka koju ostvaruje već nakon prvog perioda i koja iznosi čak 7344.07 m. U prvih sedam perioda to je značajno veće od svih ostalih simulacija. U zadnjim dvama periodima P2D ipak ostvaruje najveću prijeđenu udaljenost poruka koja je za 2% veća i od P3D udaljenosti. U usporedbi s GEO-VS algoritmom P2D i P3D pokazuju znatno veće udaljenosti u svim periodima, P1D ima veće udaljenosti u svim periodima osim u Periodu 5 i na kraju simulacije najveća udaljenost poruka P1D podjednaka je s GEO-VS algoritmom.

Na slici 4.16 prikazana je usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 200 vozila na cestama. Gustoća vozila u mirovanju P1D ima između 20% i 30% konstantno veću prijeđenu udaljenost u odnosu na GEO-VS algoritam. Gustoće vozila u mirovanju P2D i posebice P3D imaju značajno veću prijeđenu udaljenost poruka u odnosu na P1D i GEO-VS algoritam što je posebno izraženo na početku simulacije i kroz prvih sedam perioda vremena. Budući da se te dvije gustoće ne mijenjaju znatno kroz vrijeme, a P1D i GEO-VS algoritam rastu značajno s povećanjem vremena, na kraju simulacije razlika između svih četiriju simulacija nije velika.

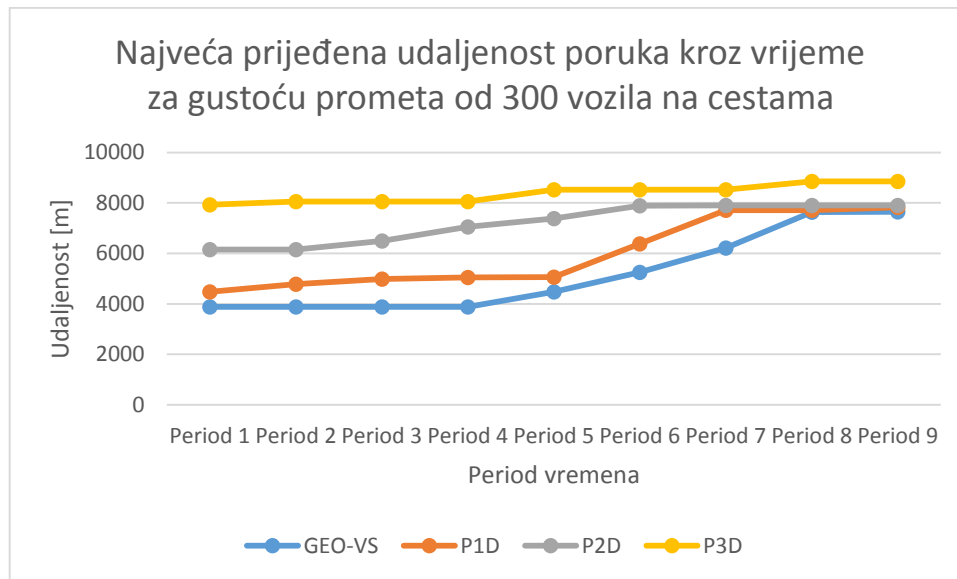


Slika 4.15. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 100 vozila na cestama



Slika 4.16. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 200 vozila na cestama

Na slici 4.17 prikazana je usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 300 vozila na cestama. Slično, kao i u prethodnoj gustoći prometa, P1D ima konstantno veće prijeđene udaljenosti poruka kroz vrijeme u odnosu na najveće udaljenosti poruka GEO-VS algoritma. P2D i posebice P3D imaju u početnim periodima značajno veću prijeđenu udaljenost poruka u odnosu na oba rješenja. Pri kraju simulacije ta se razlika smanjuje i za P2D nestaje dok za P3D prijeđena udaljenost ostaje 12% veća.



Slika 4.17. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 300 vozila na cestama

Rezultati simulacija pokazuju da model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju daje značajno bolje performanse u svim korištenim mjerilima vrednovanja u odnosu na GEO-VS algoritam u kojemu se ne koriste vozila u mirovanju za komunikaciju u ad-hoc mrežama vozila. U svim rijetkim gustoćama prometa na cestama prosječna pokrivenost mreže porukama značajno raste s porastom broja vozila u mirovanju koja sudjeluju u rasprostiranju poruka. To je usko povezano s prosječnim dometom poruka od mjesta nastanka koji također značajno raste s porastom broja vozila u mirovanju koja sudjeluju u rasprostiranju poruka. Korištenje vozila u mirovanju osigurava i puno brže rasprostiranje poruka kroz mrežu što rezultira značajno manjim prosječnim kašnjenjem u dostavljanju poruka, pogotovo u okolinama u kojima promet nije jako rijedak (200 i 300 vozila na karti). Rezultati rasprostiranja poruka kroz vrijeme pokazuju da neposredno nakon što se dogodio neki događaj i nakon što je poslana prva poruka o tom događaju, vozila u mirovanju osiguravaju u vrlo kratkom vremenu jako široku rasprostranjenost te poruke što posljedično znači da će veliki broj vozila u kratkom vremenu primiti informaciju o tom događaju. Može se zaključiti da korištenje i znatno manjeg broja vozila u mirovanju u odnosu na ukupan prosječan broj parkiranih vozila u gradskim okolinama u komunikaciji u ad-hoc mrežama vozila značajno unaprjeđuje učinkovitost rasprostiranja poruka tako što povećava pokrivenost mreže porukama, smanjuje kašnjenja u dostavljanju poruka i osigurava značajno veći domet poruka, pogotovo u početku rasprostiranja poruke.

5. METODA EVALUACIJE POSTUPAKA RASPROSTIRANJA PORUKA U STVARNOJ OKOLINI MREŽA VOZILA

Dinamična mrežna topologija u ad-hoc mrežama vozila predstavlja velike izazove u razvoju aplikacija i protokola. Testiranje performansi protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila uobičajeno se vrši korištenjem različitih namjenskih simulatora. Iako oni mogu simulirati mrežnu komunikaciju i promet s visokim stupnjem stvarnosti, postoje čimbenici iz stvarnog svijeta (nepredvidive situacije, vremenski utjecaji, stvarne prepreke i sl.) koji se teško mogu stvarno simulirati, a utječu na mobilnost vozila i mrežni promet. Da bi se vjerodostojno vrednovalo svako novo rješenje za ad-hoc mreže vozila, potrebno je testirati performanse u stvarnom okruženju, no to je trenutno gotovo nemoguće. Razlozi tomu su što je potreban veliki broj vozila opremljen s uređajima OBU koji posjeduju određene komunikacijske i računalne sposobnosti, a njihova je implementacija skupa, komplicirana i teško provediva na velikoj skali s velikim brojem vozila u različitim uvjetima i okolinama. Dakle, javlja se potreba za jednostavnijim i pristupačnijim načinom testiranja razvijenih aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u stvarnom svijetu. U ovom izvornom znanstvenom doprinosu predložena je metoda za testiranje i evaluaciju aplikacija i protokola u stvarnoj okolini koja koristi pametne mobilne uređaje u ad-hoc načinu rada kao čvorove u ad-hoc mreži vozila koji emuliraju OBU u vozilima. Za jednostavnu implementaciju programskog koda iz simulatora i testiranje u stvarnoj okolini razvijena je mobilna aplikacija otvorenog izvornog programskog koda pod nazivom mVANET koja koristi metodologiju simulatora Veins za ad-hoc mreže vozila. Predložena metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila zbog manjeg komunikacijskog dometa pogodna je za testiranje aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u okolini naseljenih gradskih i prigradskih područja u kojima postoji puno prepreka koje smanjuju domet signala uređaja OBU koji je tada podjednak dometu bežičnog signala pametnih mobilnih uređaja. Dio ovog doprinosa objavljen je u radu [10].

5.1. Eksperimenti velikih razmjera s ad-hoc mrežama vozila u stvarnom svijetu

Najčešći pristup u vrednovanju performansi različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila korištenje je namjenskih simulatora koji mogu što realnije simulirati stvarnu mrežnu i prometnu okolinu. Na temelju simulacijskih rezultata donosi se zaključak o performansama i kvaliteti testiranih protokola i aplikacija. Budući da se radi o simulaciji,

dobiveni rezultati nisu potpuno vjerodostojni i značajno ovise o kvaliteti simulatora. Za dobivanje stvarnih rezultata mjerenja potrebno je testirati protokole i aplikacije za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini pomoću vozila i na stvarnim uređajima OBU. Budući da još uvijek ne postoje ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini, to je teško izvedivo jer je potrebno opremiti veliki broj vozila sa skupim uređajima OBU koji imaju računalne i komunikacijske sposobnosti. Zbog toga je vrlo zahtjevno i skupo provođenje eksperimenata na velikoj skali, s velikim brojem vozila i u različitim uvjetima i okolinama. Do sada su, koliko je poznato, provedena samo dva takva velika eksperimenta koja su opisana u nastavku.

U sklopu sim^{TD} (engl. *Safe and Intelligent Mobility – Test Field Germany*) istraživačkog projekta [74] provedeno je testiranje V2V i V2I komunikacije na velikoj skali u stvarnom svijetu u Njemačkoj u blizini grada Frankfurta. U eksperimentu je korišteno 100 kontroliranih testnih vozila, 300 dodatnih vozila te 100 RSU-a koji su omogućavali vozilima da razmjenjuju podatke sa semaforima, znakovima na cestama i kontrolnim prometnim centrima. Testno je područje imalo veliku gustoću prometa što je omogućilo testiranje sigurnosti i učinkovitosti prometa u svakodnevnim uvjetima. Testno područje je bilo opremljeno i s kvalitetnom infrastrukturom za skupljanje prometnih podataka i opremom za kontroliranje prometa te je sadržavalo sve važnije kategorije cesta. Sim^{TD} arhitektura temelji se na trima podsustavima: (i) podsustav u vozilu koji omogućuje bežičnu komunikaciju s ostalim vozilima i infrastrukturom, ima korisničko sučelje, dozvoljava pristup informacijama o vozilu i sadrži aplikacije vozila; (ii) podsustav infrastrukture koji uključuje RSUs i središnju stanicu u pozadinskom sustavu; (iii) testni podsustav koji se prožima kroz sve komponente arhitekture i čija je glavna funkcija provođenje sim^{TD} testova i eksperimenata te prikupljanje i vrednovanje podataka. Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila slijedi logiku testiranja koja je provedena u sim^{TD} projektu, ali umjesto stvarnih OBUa koristi pametne mobilne uređaje koji su sveprisutni i pristupačniji za korištenje te ne zahtijevaju nikakvu posebnu implementaciju u vozila. U predloženoj je metodi moguće koristiti emulirane RSU uređaje tako da se postave statični pametni mobilni uređaji na određene lokacije u testnoj okolini.

The Mobile Century eksperiment, opisan u [75] proveden je na velikoj skali u stvarnom svijetu. Glavni je cilj eksperimenta pružiti potvrdu načela sustava za nadzor prometa koji se temelji na pametnim mobilnim uređajima s GPS modulima. U eksperimentu je korišteno 100 automobila s mobitelima Nokia N95 u SAD-u u gradu San Francisco. Automobili su voženi u krug osam sati bez prestanka na petlji dugoj 10 milja. Podaci su prikupljeni korištenjem VTL (engl. *Virtual Trip Lines*) strategije skupljanja uzoraka koja koristi geografske oznake

pohranjene u pametnim mobilnim uređajima. Kada vozila susretnu VTL, pametni mobilni uređaji pošalju podatke pozadinskom poslužitelju o trenutnoj lokaciji, brzini i smjeru. Sustav se sastojao od četiri sloja: (i) pametnog mobilnog uređaja s GPS modulom u automobilima; (ii) operatora mobilne mreže; (iii) skupljanja podataka i procjene prometa na pametnom mobilnom uređaju; (iv) razmjene informacija. Na svakom pametnom mobilnom uređaju pokrenuta je aplikacija koja je odgovorna za sljedeće funkcije: preuzimanje i spremanje linija puta s VTL poslužitelja, otkrivanje unakrsnih linija puta i filtriranje mjerenja prije razošiljanja davatelju usluga. Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila koristi princip testiranja koji je proveden u The Mobile Century eksperimentu. Ipak, u The Mobile Century eksperimentu korišten je relativno star mobitel koji ne pripada skupini pametnih mobilnih uređaja i koji ne podržava napredne funkcionalnosti i aplikacije koje su prisutne u pametnim mobilnim uređajima. Arhitektura The Mobile Century sustava je slična arhitekturi metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila, no u predloženoj se metodi ne koristi drugi sloj koji uključuje operatora mobilne mreže, nego se komunikacija odvija u ad-hoc načinu rada.

5.2. Korištenje pametnih mobilnih uređaja u ad-hoc mrežama vozila

U literaturi je pronađeno nekoliko radova koji opisuju korištenje pametnih mobilnih uređaja za različite namjene u ad-hoc mrežama vozila koji su opisani u nastavku. U [76] je opisan projekt X-NETAD (engl. *Cross-Network Effective Traffic Alert Dissemination*) koji se temelji na mrežnim aplikacijama koje se protežu kroz različite mreže (engl. *cross-network applications*) korištenjem UMTS i Wi-Fi oblika komunikacije na pametnim mobilnim uređajima. Vozila koja su spojena mobilnim internetom na infrastrukturu primaju informacije koje u ad-hoc načinu rada bežičnom mrežom dijele ostalim vozilima u dometu kao što je prikazano na slici 5.1. Razvijena je Android aplikacija koja podržava opisane oblike komunikacije i koja je korištena u eksperimentima za mjerenje i prikupljanje rezultata. U radu je testiran gubitak paketa prilikom slanja poruka između dvaju pametnih mobilnih uređaja u ad-hoc načinu rada u odnosu na brzinu prijenosa podataka i udaljenost između uređaja. Rezultati pokazuju da je najmanji gubitak paketa kod brzine od 11 Mb/s i da se s povećanjem udaljenosti linearno povećava i gubitak paketa. X-NETAD projekt uvodi i korištenje podatkovne mobilne mreže što je vrlo inovativan i zanimljiv pristup koji omogućava dijeljenje na veća geografska područja. Budući da je podatkovna mobilna mreža puno sporija od ad-hoc načina komunikacije i zahtijeva dodatnu plaćenu uslugu mrežnog operatera, trenutno takav način komunikacije još

uvijek nije opće prihvaćen u istraživačkoj zajednici. Stoga predložena metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila koristi isključivo ad-hoc način komunikacije između vozila, tj. pametnih mobilnih uređaja u vozilima.

Slika 1. dostupna u [76]



Slika 5.1. Grafički prikaz X-NETAD rasprostiranja podataka u mreži [76]

U [77] je opisana platforma iDANS koja je razvijena za operacijski sustav iOS i koja koristi iPhone pametne mobilne uređaje za razmjenu informacija između vozila. Veliki nedostaci ovakvog sustava su specifični uvjeti koji ograničavaju testiranje. Naime, da bi ad-hoc komunikacija između dvaju čvorova korištenjem bežičnih mrežnih sučelja na iPhone uređajima bila moguća, potrebno je prethodno sve čvorove spojiti na istu bežičnu ad-hoc pristupnu točku (engl. *access point*). Nakon što su jednom spojeni na istu pristupnu točku, dva se čvora mogu udaljiti od pristupne točke i nastaviti međusobnu komunikaciju uz uvjet da uređaji ne odu u način rada *sleep*. U suprotnom se bežična komunikacija gasi i to zahtijeva ponovno spajanje na istu pristupnu točku. U eksperimentalnom dijelu rada zaključeno je da je manji gubitak paketa između dvaju čvorova kada su pametni mobilni uređaji smješteni na kontrolnu ploču vozila, nego kada su smješteni na sjedalima i stoga su u predloženoj metodi evaluacije postupaka rasprostiranja poruka uređaji smješteni isključivo na kontrolnim pločama automobila. Testirana je i propusnost mreže u ovisnosti o udaljenosti između čvorova te je dokazano da je maksimalni domet Wi-Fi modula na iPhoneu uređajima 250 m, ali uz vrlo malu propusnost. U predloženoj metodi evaluacije postupaka rasprostiranja poruka eksperimentalno je testiran maksimalni domet pametnih mobilnih uređaja i kvaliteta komunikacije u ovisnosti o različitim udaljenostima i veličinama poruka da bi se dokazala opravdanost upotrebe pametnih mobilnih uređaja u ad-hoc mrežama vozila. Učinkovitost platforme iDANS u rasprostiranju poruka ipak nije testirana pomoću većeg broja pametnih mobilnih uređaja u stvarnoj okolini nego su provedene simulacije korištenjem simulatora ONE (engl. *Opportunistic Network Simulator*).

U [78] je predložena V2V komunikacija između vozila korištenjem Android pametnih mobilnih uređaja. U listopadu 2011. godine Google korporacije je proizvela Android 4.0 Ice Cream Sandwich s novom tehnologijom pod nazivom Wi-Fi Direct koja dozvoljava uređajima međusobnu komunikaciju korištenjem bežičnog mrežnog sučelja bez prethodnog spajanja na bežičnu pristupnu točku. Tehnologija Wi-Fi Direct zapravo kreira mrežnu infrastrukturu prebacivanjem Android pametnog mobilnog uređaja u prijenosnu bežičnu pristupnu točku. Trenutni API (engl. *Application Programming Interface*) iz sigurnosnih razloga zahtijeva od korisnika ručno spajanje pametnih mobilnih uređaja što je vrlo neučinkovito. Zbog toga je razvijen sustav koji koristi Android 2.2. API umjesto Wi-Fi Direct tehnologije za izravno kontroliranje bežične pristupne točke i klijentski načina rada koji omogućuje automatsko spajanje uređaja. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je takav način veoma spor i da je potrebno od 1.7 s do 3 s da bi pametni mobilni uređaji uspostavili vezu. Stoga su korišteni *rootani* pametni mobilni uređaji s kojima je moguća potpuna ad-hoc komunikacija i razošiljanje paketa UDP kao na stvarnim uređajima OBU. Provedeni su eksperimenti u kojima su mjereni komunikacijski domet i kašnjenje između pametnih mobilnih uređaja kada se nalaze u ruci korisnika, na postolju u automobilima koji stoje i automobilima koji su u pokretu. Zaključuju da maksimalni domet ovisi o proizvođaču automobila i staklima koja posjeduju. Maksimalni je komunikacijski domet pametnih mobilnih uređaja u rukama korisnika oko 200 m, kod vozila sa zatvorenim prozorima pada na samo 50 m, a kod vozila s otvorenim prozorima je oko 100 m. Zaključuju da nema velike razlike ako vozila stoje ili ako su u pokretu. Za testiranje performansi pametnih mobilnih uređaja korištenih u predloženoj metodi evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila dodana je Ping-Pong komponenta u mVANET mobilnu aplikaciju koja koristi slični princip testiranja kao što je opisan u [78].

5.3. Osnovne karakteristike mobilnih tehnologija

Pametni mobilni uređaji predstavljaju hibrid mobilnih telefona i prijenosnih računala. Postoji veliki broj različitih tipova uređaja s brojnim funkcionalnostima, a osnovna je svrha povezati korisnike i omogućiti pristup informacijama bilo kada i bilo gdje. Prema predviđanjima Gartner, Inc. korporacije [79] u 2014. godini bit će prodano sedam puta više pametnih mobilnih uređaja u usporedbi sa stolnim i prijenosnim računalima. Pametni mobilni uređaji imaju sljedeće karakteristike koje ih čine pogodnima za korištenje u ad-hoc mrežama vozila:

- višestruka bežična mrežna sučelja za komunikaciju poput 3G/LTE, Wi-Fi, Bluetooth, NFC i IR (engl. *InfraRed*)
- raznolike ugrađene senzore poput brzinomjera (engl. *accelerometer*), GPS-a, žiroskopa itd. za dobivanje konteksta informacija
- podržavanje zapisivanja multimedije pomoću ugrađene kamere, fotoaparata i mikrofona
- sofisticirano korisničko sučelje s ekranom osjetljivim na dodir koji omogućuje lakše korištenje uređaja
- male dimenzije uređaja kako bi bili lako prenosivi
- otvorene okoline za razvoj aplikacija.

Pametni mobilni uređaji imaju brojne sličnosti s prijenosnim računalima, a specifičnosti i mogućnosti koje ih razlikuju od prijenosnih računala dovele su do razvoja novih operacijskih sustava, tj. kompletnih platformi koje se sastoje od operacijskog sustava, srednjeg sloja (engl. *middleware*) i mobilnih aplikacija. Trenutno su na tržištu najzastupljenije četiri platforme, tj. Android, iOS, Windows Phone i BlackBerry platforma. Razlikuju se po tehnologiji korištenoj za razvoj, podržanim programskim jezicima i uređajima na kojima se pokreću. Android je najpopularnija platforma zbog otvorenog koda, pristupačnosti i jednostavnog razvoja aplikacija te ima najveći udio na tržištu od preko 70% od ukupnog tržišta. Zbog navedenih se razloga kao programska podloga za implementaciju predložene metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreže vozila koristi Android platforma. Budući da vozila još uvijek nemaju ugrađene uređaje OBU, moguće je koristiti pametne mobilne uređaje kao privremenu zamjenu za uređaje OBU jer posjeduju karakteristiku bežične komunikacije pomoću bežičnog mrežnog sučelja korištenjem protokola iz IEEE 802.11 obitelji protokola koji podržava ad-hoc način rada.

5.3.1. Android platforma

Android operacijski sustav temelji se na Linux jezgri. Primarno je namijenjen pametnim mobilnim uređajima, no zbog Linux jezgre može se pogoniti i na drugim uređajima, primjerice računalima temeljenima na x86 Intel procesorima. Osim na pametnim mobilnim uređajima Android će uskoro pronaći svoje mjesto i u automobilskoj industriji jer Intel i Wind River Systems aktivno rade na integriranju Androida na informacijsko-zabavne (engl. *infotainment*) platforme za automobile [80]. Android operacijski sustav sastoji se od pet slojeva koji omogućuju komunikaciju između sklopovlja i ostalog dijela programa, pristup raznim

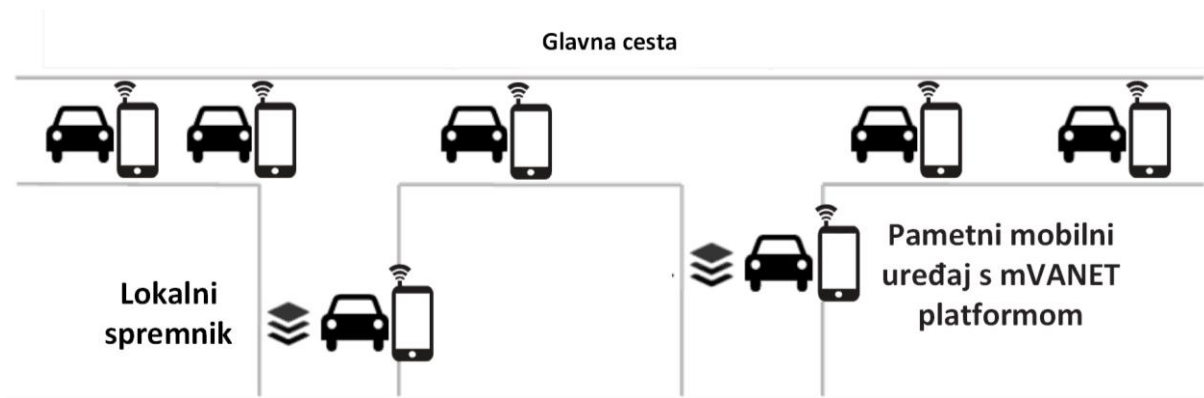
bibliotekama (engl. *libraries*) i svim aplikacijama. Android platforma posjeduje nekoliko jedinstvenih karakteristika koje nemaju ostale platforme i koje su navedene u nastavku:

- Google navigacijske karte
- pozadinske usluge i aplikacije
- jednakost svih aplikacija
- P2P slanje poruka aplikacija između uređaja.

Za razvijanje Android aplikacija moguće je koristiti više različitih programa kao što je opisano u [81]. Najpopularnija kombinacija programa za razvoj je korištenje Android SDK (engl. *Software Development Kit*), Eclipse IDE-a (engl. *Integrated Development Environment*) te ADT (engl. *Android Development Tools*) dopune (engl. *plugin*) za Eclipse. Za razvoj i prilagodbu mVANET aplikacije za predloženu metodu evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila korištena je upravo ta kombinacija alata. Android aplikacije pišu se u Java programskom jeziku u podskupini Java koja je poznata kao i Dalvik VM.

5.4. Opis metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila

Performanse razvijenih protokola i aplikacija za učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila moguće je testirati korištenjem simulatora, no mogućnost testiranja u stvarnom svijetu je vrlo ograničena jer još uvijek ne postoje vozila koja posjeduju uređaje OBU koji omogućuju komunikaciju između vozila i obradu primljenih poruka. Stoga, kako bi se omogućilo što jednostavnije i pristupačnije vrednovanje različitih postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreže vozila, predložena je metoda koja iskorištava karakteristike postojećih pametnih mobilnih uređaja. Prednost ovakvog pristupa je što nema ulaganja u infrastrukturu i opremu jer postoji veliki broj korisnika pametnih mobilnih uređaja koji su zbog lake prenosivosti prisutni i u vozilima te se mogu koristiti za eksperimente. Predložena metoda koristi pametne mobilne uređaje kao čvorove u ad-hoc mrežama vozila koji emuliraju OBU uređaje u vozilima te ad-hoc način rada bežičnog mrežnog sučelja u pametnim mobilnim uređajima za dijeljenje poruka između njih, tj. između vozila kao što je prikazano na slici 5.2. Za implementaciju, testiranje, prikupljanje eksperimentalnih rezultata i vrednovanje protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini razvijen je okvir (engl. *framework*) u kojemu je ključna komponenta mVANET Android mobilna aplikacija.



Slika 5.2. Prikaz ad-hoc mreže vozila korištenjem pametnih mobilnih uređaja

5.4.1. Zahtjevi na metodu evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila

Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila mora biti imati iste karakteristike kao stvarne ad-hoc mreže vozila kako bi rezultati mjerenja u eksperimentima bili kvalitetni i vjerodostojni. Stoga je potrebno slijediti logiku komunikacije u stvarnim ad-hoc mrežama vozila i način rada uređaja OBU. Na temelju ranije spomenutih činjenica definirani su sljedeći zahtjevi koji moraju biti ispunjeni prilikom implementacije metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila:

1. generiranje događaja: metoda mora omogućiti automatsko ili ručno generiranje događaja na uređajima u vozilima kako bi se informacije o tim događajima mogle poslati pomoću poruka prema drugim uređajima u vozilima
2. razošiljanje poruke: metoda mora podržavati funkcionalnost razošiljanja poruke prema svim susjedima koji su u komunikacijskom dometu
3. primanje razošiljane poruke: metoda mora imati ugrađenu obavijest o pristigloj razošiljanoj poruci nakon koje se mogu pokrenuti određeni događaji
4. pojedinačno razošiljanje poruke: metoda mora podržavati pojedinačno razošiljanje poruke na točno određenu adresu. Poruka pojedinačnog razošiljanja mora sadržavati adresu primatelja, a ostali ju uređaji u vozilima moraju ignorirati
5. primanje poruke pojedinačnog razošiljanja: metoda mora imati ugrađenu obavijest o pristigloj poruci pojedinačnog razošiljanja nakon koje se mogu pokrenuti određeni događaji
6. kreiranje spremnika događaja: sve pristigle poruke s korisnim sadržajem treba pohraniti u spremnik događaja

7. sakupljanje rezultata mjerenja: metoda mora imati ugrađenu funkcionalnost koja će omogućiti automatsko prikupljanje rezultata mjerenja i njihovo pohranjivanje

Popunjavanje liste susjeda koji su u komunikacijskom dometu vozila (1-skok susjedi) je funkcionalnost metode koja nameće dodatne zahtjeve:

8. slanje kontrolne *beacon* poruke: metoda mora omogućiti periodno slanje *beacon* poruka s kojom se obavještavaju sva vozila u komunikacijskom dometu da su 1-skok susjedi s pošiljateljem s kojim mogu izravno komunicirati
9. primanje kontrolne *beacon* poruke: metoda mora imati ugrađenu obavijest o pristigloj *beacon* poruci nakon koje se mogu pokrenuti određeni događaji
10. kreiranje liste susjeda: metoda mora omogućiti kreiranje liste susjeda u koju se obično spremaju susjedi koji su u komunikacijskom dometu.

5.4.2. Tehničke karakteristike predložene metode

Metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila temelji se na razvijenoj mVANET mobilnoj aplikaciji koja se koristi na pametnim mobilnim uređajima. Postojalo je nekoliko ograničenja mobilnih platformi koja su uklonjena tijekom razvoja predložene metode. Prvo se ograničenje odnosi na nemogućnost korištenja svih funkcija bežičnog mrežnog sučelja u pametnim mobilnim uređajima. mVANET aplikacija izrađena je za Android platformu koja je otvorenog izvornog koda što omogućuje veliku fleksibilnost prilikom izmjena i dorada. Trenutne verzije Androida sposobne su spojiti se na IEEE 802.11 mrežnu infrastrukturu, ali nemaju programsku podršku za rad u punom ad-hoc načinu rada iako velika većina bežičnih mrežnih sučelja u Android pametnim mobilnim uređajima podržava puni IEEE 802.11 standard i ad-hoc način rada. Da bi bilo moguće korištenje svih funkcionalnosti bežičnog mrežnog sučelja i potpunog ad-hoc načina rada sa svojstvima općeg i pojedinačnog razasijavanja, prilagođeni su jezgra (engl. *kernel*), ROM i operacijski sustav na pametnom mobilnom uređaju. To je napravljeno tako da je pokrenut Android operacijski sustav sa super korisničkim pravima (engl. *super-user rights*). Nakon toga je korištena procedura koja se zove *rooting* i pomoću *ifconfig* Linux naredbe konfigurirano je bežično mrežno sučelje. Budući da je moguće koristiti samo jedno mrežno sučelje istovremeno, konfiguriranjem tablica usmjeravanja na uređaju uklonjeno je i ovo ograničenje [76].

Predložena metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka za komunikaciju u ad-hoc mreži pametnih mobilnih uređaja koristi protokol UDP i pakete UDP koji se temelje na jednostavnom modelu prijenosa bez implicitnog dijaloga rukovanja s kojim se osigurava

pouzdanost i integritet podataka. Prilikom razasijanja paketa pomoću protokola UDP podaci se prenose svim čvorovima koji su u komunikacijskom dometu bez informacija o primitku poruke. Takav se princip komunikacije koristi na stvarnim uređajima OBU koji će biti ugrađeni u vozila koja će sudjelovati u komunikaciji u ad-hoc mrežama vozila. Maksimalna veličina paketa protokola UDP je 64 KB i u predloženoj metodi je moguće koristiti već predefinirane veličine paketa. Implementirane su tri veličine poruka: male - 100 bajta, srednje - 32 KB i velike - 64 KB. Moguće je kreirati i nove poruke čija će veličina ovisiti o podacima spremljenim u njih. Slanje paketa većih od 64 KB nije omogućeno unaprijed, no ukoliko je potrebno, moguće je implementirati vlastiti protokol koji će to omogućiti.

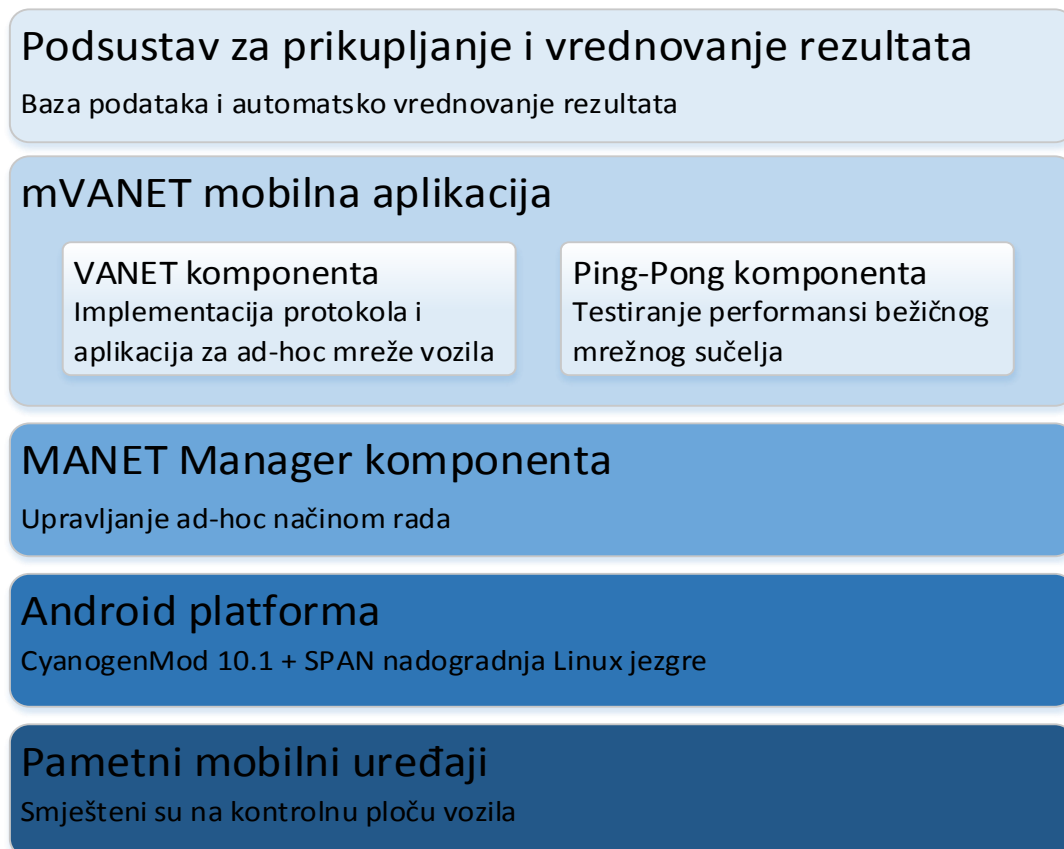
Da bi implementacija koda iz simulatora bila što jednostavnija, u predloženoj metodi evaluacije postupaka rasprostiranja poruka preuzeta je metodologija rada Veins simulatora koji je trenutno najpopularniji simulator protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u istraživačkoj zajednici. Sav programski kod koji je napisan tijekom razvoja predložene metode otvoren je i slobodan za korištenje i mijenjanje. Osnovne tehničke karakteristike metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Osnovne karakteristike metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila

Podržani mobilni operacijski sustavi	CyanogenMod i Android 2.3 i noviji
SDK (engl. Software Development Kit)	Android SDK, API razina 19
Broj podržanih uređaja	256
Programski jezik	Java
Komunikacijski protokol	UDP – IPv4
Maksimalna veličina paketa	64 KB
Okolina za korištenje	Gradska područja s preprekama (zgrade i sl.)
Mrežno sučelje	Wi-Fi 802.11b/g/n/ac → Ad-hoc način rada
Tehnike razasijanja	Opće i pojedinačno razasijanje
Dostupnost mVANET mobilne aplikacije	Otvoreni izvorni kod
Domet komunikacijskog signala	~250m

5.4.3. Okvir za evaluaciju različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini

Predložena metoda u ovom doprinosu temelji se na inovativnom pristupu testiranju i vrednovanju različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila koji omogućuje eksperimente u stvarnom svijetu korištenjem pametnih mobilnih uređaja. Osnovna je komponenta predložene metode koja omogućuje implementaciju i testiranje različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila razvijena mVANET mobilna aplikacija. U kombinaciji s pametnim mobilnim uređajima mVANET mobilna aplikacija omogućava emuliranje OBU uređaja na vozilima i stvaranje ad-hoc čvorova u mreži vozila koji imaju računalne i komunikacijske sposobnosti. Sve komponente predložene metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka stavljene su u okvir koji omogućava implementaciju, testiranje, prikupljanje eksperimentalnih rezultata i vrednovanje različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini. Arhitektura predloženog okvira temelji se na kombinaciji arhitekture mobilnih tehnologija i načela rada ad-hoc mreža vozila i prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3. Arhitektura okvira za implementaciju, testiranje, prikupljanje eksperimentalnih rezultata i vrednovanje različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini

Osnovnu komponentu predloženog okvira čini pametni mobilni uređaj koji služi za emuliranje stvarnih uređaja OBU na vozilima što mu omogućuju komunikacijske i računalne karakteristike koje posjeduje. Najvažnija je funkcionalnost pametnih mobilnih uređaja mogućnost komunikacije u punom ad-hoc načinu rada pomoću bežičnog mrežnog sučelja. Android platforma je komponenta koja služi za pokretanje ostalih programskih komponenti. Temelji se na CyanogenMod 10.1 platformi koja je razvijena kao slobodan i otvoreni izvorni programski kod koji se temelji na službenim izdanjima Android operacijskog sustava [82]. Pruža mogućnosti i opcije koje nisu podržane u službenim distribucijama Androida, a korisne su u primjeni predložene metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka. To su podrška za potpuno Wi-Fi, Bluetooth i USB povezivanje te upravljanje ovlastima aplikacija.

Komponenta MANET Manager [83] otvorenog izvornog programskog koda preuzeta je s GitHuba [84] i korištena je kao osnova za razvoj mVANET mobilne aplikacije. Komponenta MANET Manager omogućava uspostavljanje i konfiguriranje MANET mreže pametnih mobilnih uređaja u ad-hoc načinu rada i komunikaciju korisnika bez korištenja mreže mobilnih operatera. Pruža programsko sučelje za međuprocenu komunikaciju pomoću kojeg mVANET mobilna aplikacija upravlja ad-hoc načinom rada. Sučelje se sastoji od poruka prikazanih u programskom kodu 5.1 kojima se može pokrenuti, zaustaviti, dohvatiti status i ponovno pokrenuti ad-hoc način rada te dohvatiti, izmijeniti i učitati konfiguracija.

```
public static final int COMMAND_REGISTER = 0;
public static final int COMMAND_UNREGISTER = 1;
public static final int COMMAND_START_ADHOC = 2;
public static final int COMMAND_STOP_ADHOC = 3;
public static final int COMMAND_RESTART_ADHOC = 4;
public static final int COMMAND_MANET_CONFIG_UPDATE = 5;
public static final int COMMAND_MANET_CONFIG_LOAD = 6;

public static final int QUERY_ADHOC_STATUS = 10;
public static final int QUERY_MANET_CONFIG = 11;
```

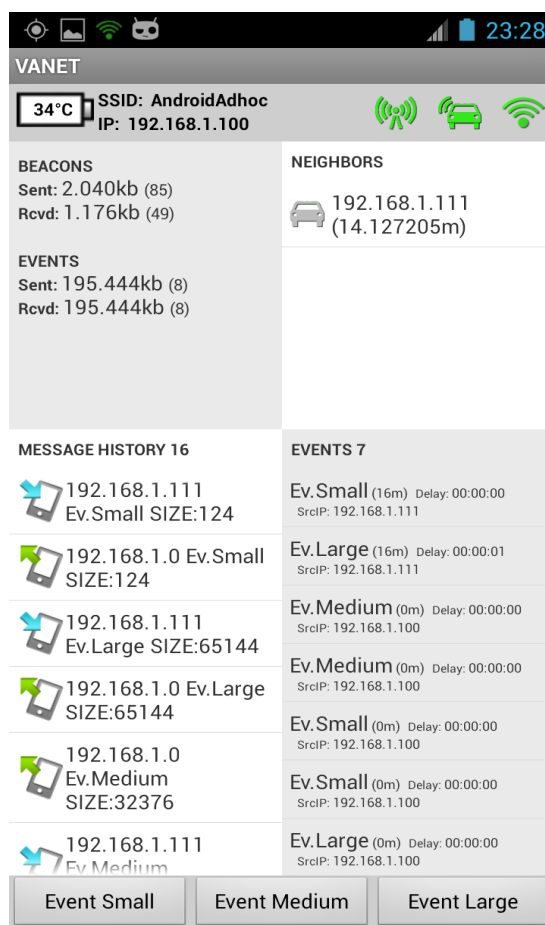
Programski kod 5.1. Poruke za upravljanje MANET Manager komponentom

MANET Manager komponenta omogućuje postavljanje sljedećih eksperimentalnih postavki koje su važne za primjenu predložene metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka:

- SSID (engl. *Service Set Identification*) – postavljanje imena bežične mreže

- prijenosna snaga (engl. *transmit power*) – postavljanje prijenosne snage bežičnog mrežnog uređaja
- bežično sučelje (engl. *wireless interface*) – odabir mrežnog sučelja
- IP adresa – postavljanje IP adrese na odabranom mrežnom sučelju.

mVANET mobilna aplikacija najvažnija je komponenta u predloženoj okolini. Nastala je grananjem MANET Manager komponente na GitHub usluzi za *online* pohranu projekata. mVANET mobilna aplikacija sastoji se od dviju manjih komponenti koje omogućuju testiranje performansi bežičnog mrežnog sučelja i implementaciju i testiranje protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila. Ključna komponenta mVANET mobilne aplikacije jest VANET komponenta u kojoj je omogućena nadogradnja i implementacija algoritama i protokola za ad-hoc mreže vozila. Programsko sučelje VANET komponente napravljeno je po uzoru na Veins simulator ad-hoc mreža vozila te je moguće jednostavno prenošenje izvornog koda iz Veins simulatora u mVANET mobilnu aplikaciju. Grafičko je sučelje VANET komponente prikazano na slici 5.4.

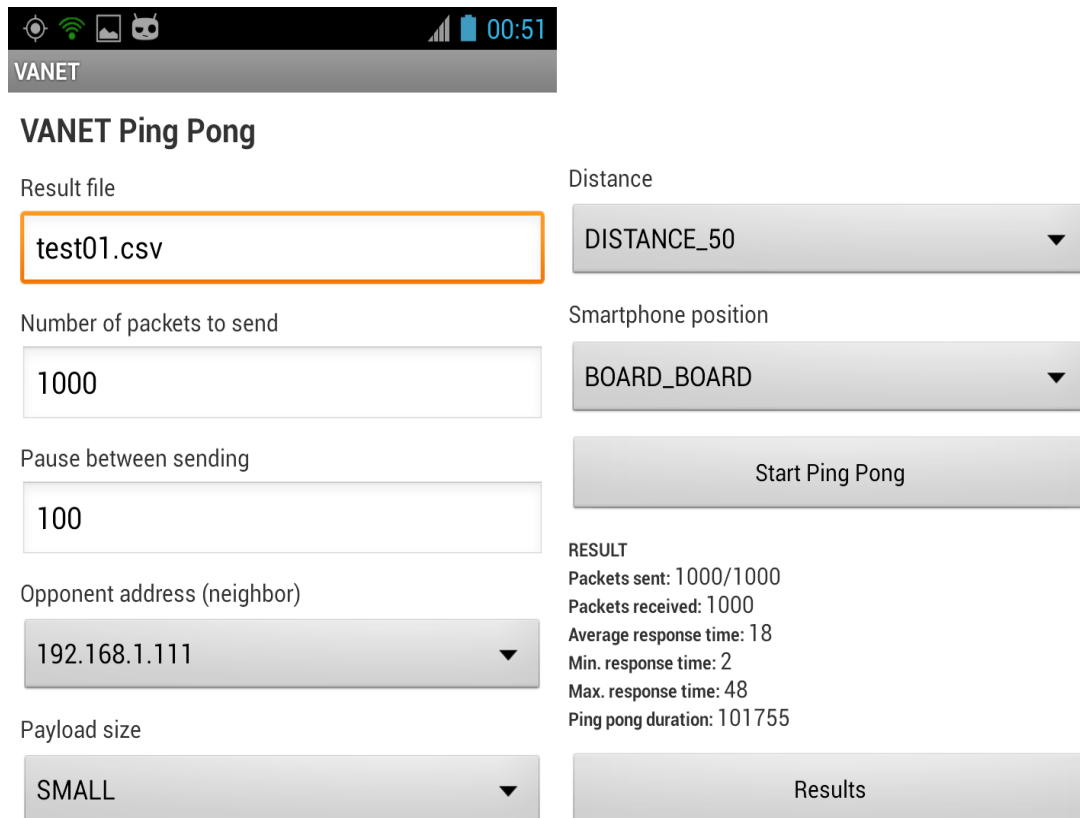


Slika 5.4. Grafičko sučelje VANET komponente

Grafičko sučelje VANET komponente pruža brojne mogućnosti i opširnu statistiku koja se može pratiti tijekom provođenja eksperimenta. Moguće je kreiranje događaja s različitom količinom podataka i pokretanje i zaustavljanje ad-hoc načina rada, VANET komponente te razošiljanja i primanja *beacon* poruka. Statistički se podaci mogu pratiti u stvarnom vremenu. Prikazani su podaci o ukupnoj količini i broju primljenih i razošiljanih *beacon* i podatkovnih poruka, lista susjeda s IP adresama i trenutnoj udaljenosti, povijest razošiljanih i primljenih podatkovnih poruka i popis događaja koji se nalaze u spremniku događaja.

Ping-Pong komponenta predstavlja dodatnu funkcionalnost predložene metode evaluacije postupka rasprostiranja poruka i služi za testiranje performansi bežičnog mrežnog sučelja na pametnim mobilnim uređajima (slika 5.5). Prijenosna snaga primopredajnika IEEE 802.11 standarda određena je zakonom i duljina dometa bežičnog signala pametnih mobilnih uređaja ovisi o osjetljivosti prijemnika što je usko povezano s brzinom prijenosa podataka i modulacijom. Postoji više inačica 802.11 standarda, poput a/b/g/n/ac, koji su ugrađeni na pametne mobilne uređaje i koji imaju različite karakteristike. Na kvalitetu i domet signala značajno utječu i prepreke u okolini, položaj pametnog mobilnog uređaja u vozilu, specifikacije vjetrobranskog stakla i stakla na vratima, položaj prozora na vratima (otvoren-zatvoren), iščezavanje signala (engl. *fading*), upijanje signala (engl. *absorption*), višestazne smetnje (engl. *multipath interference*) itd. Implementirana je Ping-Pong komponenta po uzoru na [78] kojom je moguće testirati performanse bežičnog mrežnog sučelja na pametnim mobilnim uređajima i dobiti podatke o dometu signala, brzini prijenosa, gubitku paketa i kašnjenjima u ad-hoc mreži. Razvijeno grafičko sučelje Ping-Pong komponente ima mogućnost podešavanja različitih eksperimentalnih parametara i prikaz statistike u stvarnom vremenu tijekom eksperimenta. Ping-Pong komponenta radi tako da se periodno s uređaja pošiljatelja u pojedinačnom razošiljanju šalju paketi UDP različitih predefiniranih veličina prema uređaju primatelju koji na svaki primljeni paket odgovara s istim paketom. Ovakav se način komunikacije popularno naziva Ping-Pong jer se isti paket primljen s uređaja pošiljatelja šalje njemu nazad. Korisnik može sam definirati period slanja, veličinu i broj Ping paketa u grafičkom sučelju Ping-Pong komponente. Na kraju testiranja automatski se generira datoteka s rezultatima mjerenja.

Podsustav za prikupljanje i vrednovanje rezultata mjerenja automatski se aktivira prilikom pokretanja eksperimenta i prikuplja izmjerene parametre te računa ostala mjerila vrednovanja koja nije moguće mjeriti. Nakon završenog eksperimenta rezultati se mogu spremirati u bazu podataka i usporediti se s drugim pohranjenim rezultatima.

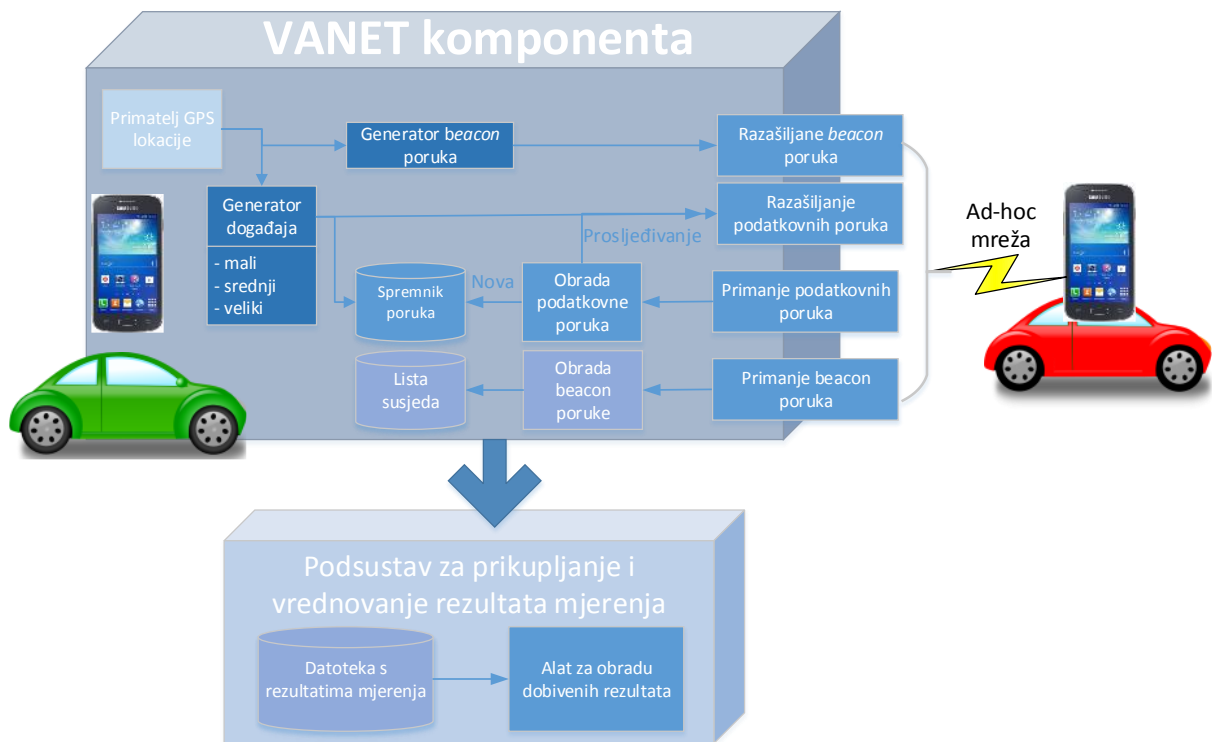


Slika 5.5. Grafičko sučelje Ping-Pong komponente

5.4.4. Opis funkcionalnosti predložene metode

Osnovne funkcionalnosti metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila ugrađene su u VANET komponentu čija je struktura prikazana na slici 5.6. Napravljena je po uzoru na Veins simulator ad-hoc mreža vozila i omogućava jednostavnu implementaciju i nadogradnju razvijenih algoritama i protokola za ad-hoc mreže vozila. Osnovni dio VANET komponente prikazan je u programskom kodu 5.2 i sadrži implementaciju osnovnih funkcionalnosti poput komunikacije na niskoj razini pomoću protokola UDP, održavanja liste susjednih vozila koja su u komunikacijskom dometu, dohvaćanja GPS lokacije uređaja, procesa prevođenja struktura podataka u sekvencu bajtova (engl. *serialization*) i obratno, i rada s nitima u kojima se izvršavaju svi dugotrajni procesi. Funkcionalnosti osnovnog dijela koriste se kroz aplikacijsko sučelje koje olakšava implementaciju aplikacijskog dijela.

Funkcionalnosti metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila koje su bitne za komunikaciju između pametnih mobilnih uređaja koji su smješteni u vozilima i tako čine ad-hoc mrežu vozila su sljedeće:



Slika 5.6. Struktura VANET komponente

- periodno razrašiljanje *beacon* poruka: većina aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila zahtijeva funkcionalnost periodnog razrašiljanja *beacon* poruka kako bi vozila dobila informacije o gustoći prometa te broju i karakteristikama susjeda. Informacije koje se nalaze u *beacon* porukama uglavnom sadrže mrežnu topologiju i radni status vozila. *Beacon* poruke predstavljaju mali trošak u smislu trošenja resursa mreže jer su većinom puno manje od klasičnih podatkovnih poruka. *Beacon* poruke se razrašiljaju u različitim intervalima, najčešće od 0.1 s do 5 s, no taj je interval moguće proizvoljno definirati. Ovisno o scenariju *beacon* poruke se mogu distribuirati po 1-skok ili višestruki-skok principu. Programski kod zadatka koji se izvršava na okidanje vremenskog sklopa za periodno razrašiljanje *beacon* poruka prikazan je u Prilogu I u programskom kodu P1. gdje se izvršavaju sljedeće radnje:
 - generira se jedinstveni ID broj *beacon* poruke
 - kreira se struktura podataka *beacon* poruke
 - prevodi se struktura podataka u sekvencu bajtova
 - kreira se UDP paket u koji se stavljaju podaci koji se šalju i odredišna IP adresa.
- primanje *beacon* poruka i ažuriranje liste susjeda: osnovna namjena *beacon* poruka je dobivanje informacija o susjedima i pa ju je nakon primitka potrebno obraditi i ažurirati listu susjeda. Obrada se vrši tako da se iz primljenog paketa UDP i strukture podataka

čitaju IP adresa i lokacija pošiljatelja, te se na temelju lokacije računala udaljenost pošiljatelja od trenutne lokacije. Na kraju procesa primanja *beacon* poruke ažurira se lista susjeda s primljenim i izračunatim podacima o IP adresi, lokaciji i udaljenosti susjeda. Programski kod za funkcionalnost primanja *beacon* poruka prikazan je u Prilogu I u programskom kodu P2.

- razošiljanje podatkovnih poruka: funkcionalnost razošiljanja podatkovnih poruka u ad-hoc mrežama vozila potrebna je u dvama slučajevima. Prvi, kada je generiran neki događaj na vozilu i drugi, kada je primljena podatkovna poruka koju je potrebno prosljediti ili ponovno razošiljati. Prilikom razošiljanja podatkovne poruke potrebno je u strukturi podataka navesti tip podataka i postaviti podatke koji se prenose porukom. Podaci koji se prenose definiraju se specifično za potrebe implementiranih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila. Programski kod za funkcionalnost razošiljanja podatkovnih poruka prikazan je u Prilogu I u programskom kodu P3.
- primanje podatkovnih poruka: funkcionalnost primanja podatkovnih poruka izvršava primanje paketa UDP koje zatim prosljeđuje na obradu implementiranom protokolu ili aplikaciji. Programski kod za funkcionalnost primanja podatkovnih poruka prikazan je u Prilogu I u programskom kodu P4.
- dohvaćanje GPS lokacije uređaja: funkcionalnost dohvaćanja GPS lokacije uređaja, a time i vozila, vrlo je važna jer se većina aplikacija i protokola temelji na lokaciji i udaljenosti vozila i njegovih susjeda. Implementirana funkcionalnost prima i ažurira GPS lokaciju svake sekunde. Programski kod za funkcionalnost za primanje GPS lokacije prikazana je u Prilogu I u programskom kodu P5.

Struktura podataka prikazana na slici 5.7 kreirana je za razošiljanje *beacon* i podatkovnih poruka. U njoj se nalaze minimalni podaci koji su potrebni za većinu protokola i aplikacija, no moguće ju je proširiti. U osnovnoj se strukturi nalazi jedinstveni identifikacijski broj poruke, podatak o tipu poruke koja se prenosi te podaci koji su neovisni o tipu poruke poput adrese pošiljatelja, adrese primatelja, lokacije na kojoj se nalazi vozilo u trenutku razošiljanja poruke i podaci koji se žele razošiljati.

ID	Tip poruke: događaj ili <i>beacon</i>	Adresa izvornog čvora	Adresa primatelja (ID primatelja ili 0 za <i>razošiljanje</i>)	GPS koordinate trenutne pozicije	Podaci
----	---------------------------------------	-----------------------	---	----------------------------------	--------

Slika 5.7. Osnovna struktura *beacon* i podatkovnih poruka

```

public abstract class VANETServiceBase extends Service {

    /* Definicija apstraktnih metoda čija se implementacija mora nalaziti u
    naslijeđenoj VANETService klasi. */
    public abstract void onCreateVANETService();
    public abstract void onStartVANETService();
    public abstract void onDestroyVANETService();
    public abstract void onMessage(VANETMessage dataMessage);
    public abstract void onBeaconReceived(VANETMessage beaconMessage, VANETNode
neighbor);
    public abstract void onBeaconSent(VANETMessage beaconMessage);
    public abstract void onNeighborAppeared(VANETNode node);
    public abstract void onNeighborDisappeared(VANETNode node);
    public abstract void onLocationChanged(Location location);

    /* Metode programskog sučelja prema VANETService klasi. */
    public void sendMessage(VANETMessage message) { /*...*/ }
    public void startBeacon() { /*...*/ }
    public void stopBeacon() { /*...*/ }
    public Map<String, VANETNode> getNeighbourNodesMap() { /*...*/ }
    public void setBeaconPeriod(long milliseconds) { /*...*/ }
    public boolean isBeaconRunning() { /*...*/ }
    public Location getCurrentLocation() { /*...*/ }

    /* Klase za razaslanje i primanje beacon poruka*/
    private class VANETBeaconBroadcastTimerTask extends TimerTask { /*...*/ }
    private class VANETBeaconListenerThread extends Thread { /*...*/ }

    /* Klase za razaslanje i primanje podatkovnih poruka*/
    private class VANETMessageListenerThread extends Thread { /*...*/ }
    private class VANETMessageSendingThread extends Thread { /*...*/ }

    /* Klasa za primanje GPS lokacije*/
    private class MyLocationListener implements LocationListener { /*...*/ }
}

```

Programski kod 5.2. *VANETServiceBase* metode i unutarnje klase

5.4.5. Osnovne programske metode

Osnovne programske metode VANET komponente razvijene su prema uzoru na *TraCIDemo11p* klasu u Veins simulatoru kako bi prenošenje programskog koda različitih algoritama i protokola za ad-hoc mreže vozila bilo što jednostavnije. Osnovne programske metode predstavljaju višu razinu apstrakcije i sakrivaju kompleksnost implementacije programskog koda za komunikaciju protokolom UDP i dohvaćanje GPS lokacije. Osnovne programske metode koje se koriste za implementaciju razvijenih algoritama i protokola za ad-hoc mreže vozila su:

- *onMessage(VANETMessage dataMessage)*: poziva se kada je primljena podatkovna poruka. Služi za implementaciju algoritama i protokola za rad s podatkovnim porukama. Istovjetna je *onData()* metodi u Veins simulatoru.
- *onBeaconReceived(VANETMessage beacon, VANETNode neighbor)*: poziva se kada je primljena *beacon* poruka. Istovjetna je *onBeacon()* metodi u Veins simulatoru. U osnovnom dijelu VANET komponente postoji implementacija koja obrađuje primljene *beacon* poruke i ažurira listu susjeda. Poziv ove apstraktne metode služi kao obavijest za dodatne aktivnosti koje proširuju osnovnu funkcionalnost ili implementaciju nove *beacon* funkcionalnosti.
- *onBeaconSent(VANETMessage beacon)*: poziva se nakon što je poslana *beacon* poruka. Služi za obavještanje VANET komponente o poslanoj *beacon* poruci te pokretanje periodnih zadataka koji se izvršavaju u skladu s periodom slanja *beacon* poruke kojeg je moguće promijeniti pomoću varijable *beacon_period*
- *sendMessage()*: koristi se za slanje podatkovnih i *beacon* poruka i istovjetna je *sendWSM()* metodi u Veins simulatoru. Prilikom slanja poruke potrebno je navesti tip podataka i postaviti podatke koji se prenose porukom. Kod slanja *beacon* tipa poruke nije potrebno postaviti podatke koji se šalju porukom.

5.4.6. Koraci za primjenu predložene metode

Za primjenu metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila potrebno je slijediti korake opisane u nastavku:

1. instalirati Eclipse, Android SDK i ADT dodatak na osobno računalo
2. preuzeti zadnju verziju mVANET aplikacije s GitHub online usluge koja je dostupna na [85]
3. prepisati programski kod iz simulatora u VANET komponentu mVANET mobilne aplikacije korištenjem Android SDK
4. testirati implementirani kod pomoću emulatora ili stvarnog uređaja
5. izvesti (engl. *export*) mVANET mobilnu aplikaciju u kojoj je implantiran algoritam ili protokol za ad-hoc mreže vozila u *.apk* ekstenziju
6. uzeti Android pametne mobilne uređaje pomoću kojih će se vršiti testiranje protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila. Preporučeno je korištenje minimalno pet uređaja
7. dobiti *root* prava na pametnim mobilnim uređajima
8. kopirati mVANET aplikaciju na pametne mobilne uređaje

9. instalirati mVANET aplikaciju na svim testnim uređajima (maksimalno 256 uređaja)
10. postaviti pametne mobilne uređaje u automobile na kontrolnu ploču radi boljeg dometa i bolje kvalitete signala
11. pokrenuti aplikaciju i provesti eksperimente
12. kopirati rezultate mjerenja s pametnih mobilnih uređaja u bazu podataka korištenjem podsustava za prikupljanje i vrednovanje rezultata mjerenja.

5.4.7. Parametri za vrednovanje postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila

Parametri za vrednovanje postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila koji se mogu koristiti u predloženoj metodi prikazani su u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Opis parametara za vrednovanje različitih postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila

Parametar	Mjerna jedinica	Opis
N_{pd}	broj	Ukupni broj poslanih podatkovnih poruka u eksperimentu
N_{pb}	broj	Ukupni broj poslanih <i>beacon</i> poruka u eksperimentu
C_p	%	Pokrivenost mreže po poruci
d_{MSG}	s	Kašnjenje – vrijeme koje je potrebno da poruka dođe od izvora do odredišta
N_{pr}	broj	Ukupni broj zalihosnih poruka
D_{AVG}	m	Prosječna relativna udaljenost poruke od izvora do odredišta
D_{MAX}	m	Maksimalna relativna udaljenost poruke od izvora do odredišta
$N_R = N_{pd}/N_{pp}$	broj	Normalizirano opterećenje usmjeravanja
N_{ping}	broj	Ukupni broj poslanih Ping paketa
N_{pong}	broj	Ukupni broj primljenih Pong paketa
PER	broj [0-1]	PER (engl. <i>Packet Error Rate</i>) prikazan (5-1)
t_{RS}	ms	Vrijeme odziva koje protekne između početka slanja Ping paketa i primitka Pong paketa

Vrijednosti se navedenih parametara automatski mjere ili računaju tijekom provođenja eksperimenta i na kraju testiranja se zapisuju u oblikovanu datoteku na svakom pametnom uređaju zasebno. Podsustav za prikupljanje i vrednovanje rezultata mjerenja omogućava

spremanje rezultata mjerenja u bazu podataka i usporedbu s drugim pohranjenim rezultatima. Navedeni su parametri standardna mjerila vrednovanja koja se koriste u ad-hoc mrežama vozila kako bi se vrednovala i usporedile performanse različitih protokola i aplikacija. Uz navedene je parametre za potrebe kompleksnijih eksperimenata moguće implementirati mjerenje drugih potrebnih parametara korištenjem VANET komponente predložene metode.

5.4.8. Okolina za primjenu predložene metode

U metodi evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila za komunikaciju između vozila koriste se pametni mobilni uređaji. Oni ostvaruju bežičnu komunikaciju pomoću ugrađenog bežičnog mrežnog sučelja korištenjem protokola iz IEEE 802.11 obitelji protokola koji podržava ad-hoc način rada. U velikoj većini pametnih mobilnih uređaja, temeljenih na Android platformi, ugrađeno je bežično mrežno sučelje s jednim ili više od sljedećih Wi-Fi 802.11 standarda: a/b/g/n/ac. Najveći domet komunikacije Wi-Fi 802.11n standarda iznosi oko 250 m, a najveći domet DSRC/IEEE 802.11 p standarda koji je ugrađen u OBU uređaje i koji će se koristiti u ad-hoc mrežama vozila iznosi 1000 m. Manji najveći komunikacijski domet pametnih mobilnih uređaja u ad-hoc načinu rada nije veliki nedostatak u gusto naseljenim područjima jer u takvim okolinama domet OBU-a drastično pada na čak manje od 30 m [66] zbog prepreka poput zgrada, drveća i slično. Predložena metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila zbog manjeg komunikacijskog dometa pogodna je za testiranje aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u scenariju naseljenih gradskih i prigradskih područja u kojima postoji mnogo prepreka koje smanjuju domet signala uređaja OBU koji je tada približno jednak dometu bežičnog signala pametnih mobilnih uređaja.

5.5. Eksperimentalne postavke i mjerila vrednovanja

Provedena su dva eksperimenta korištenjem pametnih mobilnih uređaja, tj. Ping-Pong i VANET eksperiment. Prije testiranja potrebno je podesiti eksperimentalne postavke pametnih mobilnih uređaja kako bi njihove karakteristike bile iskorištene u potpunosti. U Ping-Pong eksperimentu testiraju se performanse ad-hoc bežične komunikacije između dvaju pametnih mobilnih uređaja u automobilima koji stoje na mjestu i koji se nalaze u idealnoj okolini u kojoj nema prepreka i drugih vozila. VANET eksperiment je zahtjevniji jer uključuje više pametnih mobilnih uređaja u automobilima koji su u pokretu. Eksperimentalne postavke eksperimenata i pametnih mobilnih uređaja te mjerila vrednovanja prikazani su u nastavku.

5.5.1. Eksperimentalne postavke pametnih mobilnih uređaja

U eksperimentima su korišteni identični Android pametni mobilni uređaji Samsung I9300 Galaxy S3 s karakteristikama prikazanim u tablici 5.3. Procesorska snaga i količina memorije vrlo je velika i dovoljna za normalan rad mVANET aplikacije, slanje poruka i obradu primljenih poruka. Ekran je dovoljne veličine (4.8 ") za pregledan rad, kontrolu primljenih poruka i slanje informacija o događajima u prometu. Mrežna sučelja koja se mogu koristiti su mobilna podatkovna mreža u 2G i 3G brzinama rada, Bluetooth i WLAN. Komunikacija treba biti u punom ad-hoc načinu rada bez korištenja infrastrukture i stoga nije korištena mobilna podatkovna mreža. Bluetooth v4.0 IEEE 802.15.1 standard radi u frekvencijskom opsegu od 2.4 GHz do 2.485 GHz i može biti korišten za ad-hoc komunikaciju između vozila, tj. pametnih mobilnih uređaja, ali najveća propusnost od samo 24 Mbit/s i najveći komunikacijski domet od 90 m su značajno manji nego kod korištenja bežičnog mrežnog sučelja. Stoga je korišteno mrežno sučelje prema drugim vozilima, tj. pametnim mobilnim uređajima Wi-Fi 802.11n standard koji uvodi MIMO (engl. *multiple-input multiple-output*) antene. Radi na dvama frekvencijskim opsezima od 2.4 GHz i 5 GHz i podržava najveću brzinu prijenosa podataka od 54 Mbit/s do čak 600 Mbit/s. U eksperimentima je korišten 802.11n standard s frekvencijskim opsegom od 5 GHz jer omogućava brži prijenos podataka i bliži je frekvenciji rada stvarnih OBU uređaja (5.9 GHz). Prijenosna snaga bežičnog mrežnog uređaja može biti ručno podešena na vrijednosti od 0-1258 mW (0-32 dBm) ili automatski gdje uređaj sam odlučuje koju će prijenosnu snagu koristiti. U eksperimentu je korištena ručno postavljena maksimalna vrijednost prijenosne snage od 1258 mW (32 dBm) kako bi bežični signal bio što kvalitetniji i kako bi se mogao ostvariti maksimalni domet od 250 m po specifikacijama 802.11n standarda.

Tablica 5.3. Osnovne specifikacije Samsung S3 uređaja korištenog u eksperimentima

Komponenta	Specifikacije
CPU	Quad-core 1.4 GHz Cortex-A9
RAM memorija	1 GB
Ekran	720x1280 piksela, 4.8 "
Podatkovna mreža	2G i 3G
WLAN	Wi-Fi 802.11 a/b/g/n, dual-band, DLNA, Wi-Fi Direct, hotspot
Bluetooth	v4.0 with A2DP, EDR
Senzori	Akcelerometar, žiroskop, blizina, kompas, barometar
GPS	A-GPS i GLONASS
Operacijski sustav	CyanogenMod 10.1

Za dobivanje trenutne pozicije vozila koristi se A-GPS (engl. *Assisted GPS*) koji uz GPS modul ugrađen u pametni mobilni uređaj koristi i bežični signal te signal mobilnog operatera za preciznije određivanje trenutne lokacije. Uz GPS sustav Samsung S3 podržava i GLONASS (engl. *Global Navigation Satellite System*) svemirski satelitski navigacijski sustav kojim upravljaju ruske zračne obrambene snage i koji je podjednake preciznosti kao i GPS.

5.5.2. Eksperimentalne postavke i mjerila vrednovanja Ping-Pong eksperimenta

Testir-anja bežičnog mrežnog sučelja na pametnim mobilnim uređajima izvode se ovisno o udaljenosti između dvaju uređaja u automobilima kako bi se izmjerile performanse na određenim udaljenostima i odredila maksimalna udaljenost na kojoj je moguća komunikacija. Eksperimentalne postavke Ping-Pong eksperimenta su sljedeće:

- eksperiment se provodi za sljedeće veličine paketa UDP: mala - 100 bajta, srednja - 32 KB i velika - 64 KB te nasumičnim odabirom veličine paketa tijekom jednog testa
- broj ukupno poslanih Ping paketa u jednom eksperimentu je 1000 i svi su eksperimenti ponovljeni pet puta
- period slanja Ping paketa je 100 ms što rezultira sljedećim brzinama prijenosa podataka: 1 KB/s, 320 KB/s, 640 KB/s i nasumična brzina prijenosa podataka
- korištene su sljedeće udaljenosti između automobila u kojima su smješteni pametni mobilni uređaji: 50 m, 100 m, 150 m, 200 m i 250 m
- pametni mobilni uređaji su postavljeni na kontrolnu ploču automobila pomoću univerzalnog nosača
- automobili su okrenuti jedan prema drugome i prozori automobila su zatvoreni
- okolina za testiranje je izolirana cesta na kojoj nema prometa i prepreka te uređaji imaju međusobnu optičku vidljivost.

Mjerila vrednovanja korištena u Ping-Pong eksperimentu su sljedeća:

- PER (engl. *Packet Error Rate*): dobije se računanjem omjera razlike broja poslanih Ping paketa N_{Ping} i primljenih Pong paketa N_{Pong} u odnosu na ukupan broj poslanih Ping paketa kao što je prikazano u (5-1):

$$PER = \frac{N_{Ping} - N_{Pong}}{N_{Ping}} \quad (5-1)$$

- vrijeme odziva t_{RS} [ms]: vrijeme koje protekne između početka slanja Ping paketa i primitka Pong paketa istoga sadržaja na uređaju pošiljatelju. Računa se minimalno, maksimalno i srednje vrijeme odziva.

5.5.3. Eksperimentalne postavke i mjerila vrednovanja VANET eksperimenta

Za dokazivanje korisnosti predložene metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila napravljen je VANET eksperiment korištenjem pametnih mobilnih uređaja na primjeru aplikacije koja generira događaje, prikuplja, pohranjuje, prenosi, prosljeđuje i razasilja poruke o događajima u ad-hoc mreži vozila. mVANET aplikacija korištena za potrebe VANET eksperimenta nadograđena je sa sljedećim funkcionalnostima:

- periodičnim razasiljanjem *beacon* poruka u intervalu od 2 s - u *beacon* poruku se zapisuje trenutna lokacija i vrijeme slanja
- primanjem *beacon* poruka - nakon što je primljena *beacon* poruka, provjerava se je li susjed već zapisan u listu susjeda. Ako je zapisan, ažurira se vrijeme njegovog opažanja, a ako nije, pokreće se registracija novog susjeda i sinkronizacija spremnika poruka
- registriranjem novog susjeda u komunikacijskom dometu i sinkronizacijom spremnika poruka – ako se susjed koji je poslao *beacon* poruku ne nalazi u listi susjeda, zapisuje se u listu susjeda i pokreće se procedura za međusobnu sinkronizaciju spremnika podatkovnih poruka u tri koraka kao što je opisano u poglavlju 3.4.3
- generiranjem novog događaja - novi događaj generira korisnik ručno pomoću tri gumba na ekranu pametnog mobilnog uređaja s kojima može odabrati slanje male, srednje ili velike poruke o događaju. Kreirana poruka pohranjuje se u vlastiti spremnik poruka o događajima i razasilja se da bi se obavijestili 1-skok susjedi o nastalom događaju
- primanjem razasiljanje poruke - nakon primitka razasiljane poruke o događaju, provjerava se nalazi li se već poruka u spremniku poruka o događajima. Ako je već ranije primljena, odbacuje se, a ako nije, pohranjuje se u spremnik poruka i ponovno razasilja.

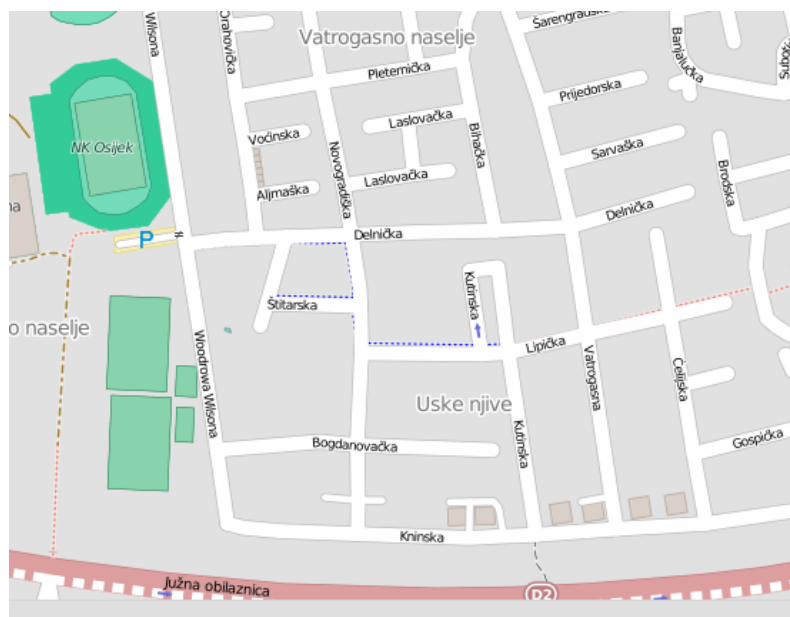
Eksperimentalne postavke VANET eksperimenta su sljedeće:

- eksperiment se provodi sa sljedećim veličinama UDP paketa: mala - 100 bajta, srednja - 32 KB i velika - 64 KB
- trajanje jednog eksperimenta je 180 s
- u prosjeku je svaki automobil generirao pet događaja (broj ukupno poslanih jedinstvenih podatkovnih paketa u jednom eksperimentu je 15)

- korištena su tri automobila vožena slučajnim rutama kretanja
- pametni mobilni uređaji su postavljeni na kontrolnu ploču automobila i prozori automobila su zatvoreni
- okolina za testiranje je gradsko naselje grada Osijeka (Stadionsko naselje) dimenzija 350x450 m kao što je prikazano na slici 5.8 s brojnim objektima (kućama i zgradama) i ostalim vozilima na cestama

Mjerala vrednovanja korištena u VANET eksperimentu su sljedeća:

- D_{AVG} [m] - prosječna udaljenost rasprostiranja poruka koja se računa kao srednja vrijednost svih euklidskih udaljenosti (prema izrazu (3-10)) primljenih poruka od mjesta na kojem su nastale
- d_{AVG} [s] - prosječno kašnjenje dostavljanja poruka koje se računa prema izrazima (3-1) i (3-2)
- C_{pAVG} [%] - prosječna pokrivenost mreže porukama koja se računa prema izrazu (3-3)



Slika 5.8. Karta gradskog naselja u kojem je proveden VANET eksperiment

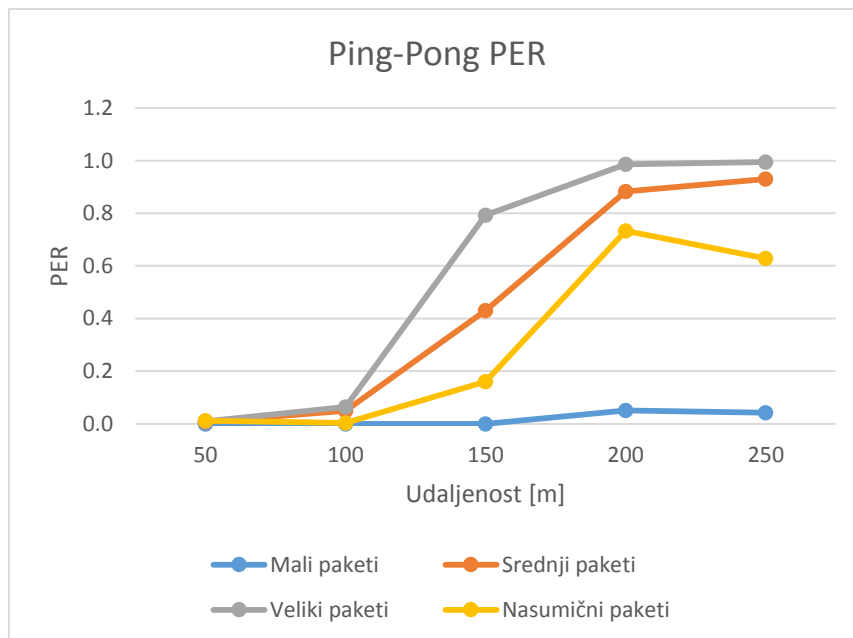
5.6. Eksperimentalni rezultati i analiza

Provedena su dva eksperimenta korištenjem pametnih mobilnih uređaja, tj. Ping-Pong i VANET eksperiment. U Ping-Pong eksperimentu cilj je testirati performanse ad-hoc bežične komunikacije između dvaju pametnih mobilnih uređaja u automobilima. U VANET eksperimentu cilj je dokazati korisnosti predložene metode evaluacije postupaka rasprostiranja

poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila pomoću pametnih mobilnih uređaja na kojima je za potrebe eksperimenta nadograđena mVANET aplikacija. Eksperimentalni rezultati i analiza obaju eksperimenata prikazani su u nastavku.

5.6.1. Ping-Pong eksperiment

Na slici 5.9 prikazani su rezultati testiranja i izračun PER-a za tri različite veličine testnih paketa i nasumični odabir tih veličina ovisno o udaljenosti između vozila u kojima su smješteni pametni mobilni uređaji. Može se zaključiti da je PER za male veličine paketa zanemariv za udaljenosti pametnih mobilnih uređaja do 150 m jer nema gubitka paketa, na udaljenosti od 200 m gubitak paketa je vrlo mali i iznosi 5%, a na udaljenosti od 250 m iznosi 4.2%.



Slika 5.9. Prikaz Ping-Pong PER-a ovisno o udaljenosti između uređaja za različite veličine paketa

Za srednje i velike pakete za udaljenosti do 100 m PER je vrlo mali, no na udaljenostima većim od 100 m drastično raste pogotovo za velike pakete. Tako gubitak paketa na udaljenosti između vozila od 150 m iznosi 79.25%, na udaljenosti od 200 m 98.65%, a na udaljenosti od 250 m 99.5%. Iz ovih je rezultata vidljivo da je maksimalni domet velikih paketa 150 m uz velike gubitke te da je domet kvalitetne komunikacije 100 m. Za srednje veličine paketa nakon vrlo malog gubitka na udaljenostima do 100 m gubitak paketa počinje linearno rasti tako da na udaljenosti od 150 m iznosi 43.05%, na udaljenosti od 200 m 88.25%, a na udaljenosti od 250 m 92.97%. Može se zaključiti da je maksimalni domet srednje veličine paketa između 150 m i

200 m jer je u tom rasponu udaljenosti gubitak paketa još uvijek podnošljiv (oko 50%) što znači da će svaki drugi paket biti uspješno dostavljen. U nasumičnom slanju ovih triju veličina paketa ostvaruju se dobre performanse do udaljenosti između vozila od 150 m. Nakon toga gubitak paketa značajno raste te je na udaljenosti od 200 m za čak 10.48% veći nego na udaljenosti od 250 m. Uspješnost dostavljanja nasumično poslanih paketa ovisi najviše o malim paketima što je vidljivo iz sličnog ponašanja u omjeru udaljenosti i gubitaka. Može se zaključiti da domet komunikacije između pametnih mobilnih uređaja značajno ovisi o veličini paketa. Moguće je postići kvalitetnu komunikaciju na maksimalnom dometu signala od 250 m po specifikacijama 802.11n standarda korištenjem samo malih paketa. Ako je potrebno koristiti veće veličine paketa, kvalitetna se komunikacija s vrlo malim gubicima može odvijati na udaljenostima do 100 m jer se na većim udaljenostima pojavljuju veliki gubici te je značajno smanjena kvaliteta komunikacije.

U tablici 5.4 prikazani su rezultati mjerenja vremena odziva ovisno o udaljenosti između pametnih mobilnih uređaja za različite veličine paketa. Mali paketi imaju vrlo malo srednje vrijeme odziva koje iznosi 20 ms za sve udaljenosti do 150 m te oko 50 ms za veće udaljenosti.

Tablica 5.4. Vrijeme odziva (srednje, minimalno i maksimalno) u ovisnosti o udaljenosti između uređaja za različite veličine paketa [ms]

	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
Mali paketi	20 (3-51.5)	20 (3-72)	20 (3-54)	48 (4.67-584.7)	50 (5-1164)
Srednji paketi	65 (28.5-441.5)	254 (44.5-1685)	1611.5 (261-2977.5)	5557.5 (814.5-13526.5)	5653 (1165-15563.3)
Veliki paketi	105.5 (50.5-438.5)	232 (70.5-2405.5)	1384 (534-2436.5)	3838.5 (1469.5-6379.5)	5045.3 (3666-6313.7)
Nasumični paketi	58 (3-454)	87.5 (3-639)	932 (3.5-2129.5)	4485.5 (998-11481)	3148 (490-11532.3)

Srednje vrijeme odziva srednjih i velikih paketa značajno je veće u odnosu na male pakete te je za udaljenosti veće od 100 m vrijeme odziva srednjih paketa veće od vremena odziva velikih paketa. To je rezultat većeg broja uspješno primljenih i vraćenih srednjih paketa na tim udaljenostima na uređaju primatelju što značajno opterećuje uređaj, povećava promet mreže i dovodi do većih kašnjenja. To je vidljivo i iz rezultata minimalnog i maksimalnog vremena odziva jer je minimalno vrijeme odziva srednjih paketa značajno manje nego kod slanja velikih paketa, a maksimalno je vrijeme odziva značajno veće. To znači da će srednji paketi biti puno brže dostavljeni nego veliki paketi kada mreža nije opterećena dok će kod veće opterećenosti

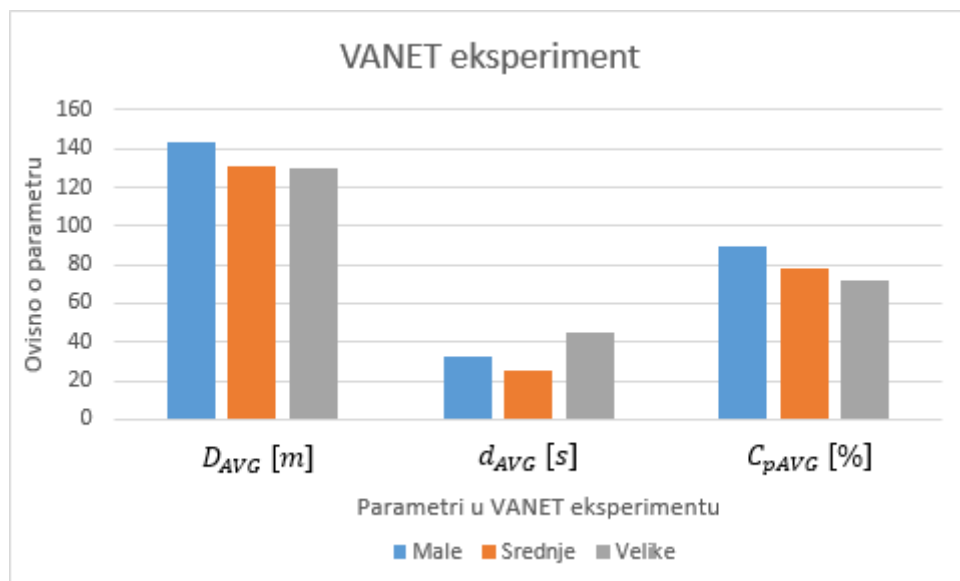
mreže srednjim paketima biti potrebno puno više vremena da budu uspješno dostavljeni, a veliki će paketi biti izgubljeni. Vrijeme odziva nasumično odabranih veličina paketa strahovito raste do udaljenosti od 200 m, nakon koje značajno pada. Budući da je gubitak paketa prikazan na slici 5.9 na udaljenosti od 250 m također značajno manji, može se zaključiti da je na toj udaljenosti vrlo mali broj uspješno primljenih srednjih i velikih paketa te da se većina mjerenja odnosi na male pakete.

Iz eksperimentalnih se rezultata Ping-Pong eksperimenta može zaključiti da je moguće korištenje pametnih mobilnih uređaja za kvalitetnu komunikaciju između vozila u ad-hoc mrežama vozila. Ugrađeno bežično mrežno sučelje u pametnim mobilnim uređajima u ad-hoc načinu komunikacije bez korištenja infrastrukture pokazuje dobre performanse prilikom korištenja malih paketa u smislu dometa komunikacije, gubitka paketa u mreži i vremenu odziva. Domet komunikacije između pametnih mobilnih uređaja po specifikacijama 802.11n standarda iznosi 250 m i moguće ga je ostvariti uz vrlo male gubitke korištenjem malih paketa veličine 100 bajta za komunikaciju. Vrijeme odziva u komunikaciji s malim paketima vrlo je malo do udaljenosti od 150 m nakon koje je vidljiv značajni porast u kašnjenju prilikom dostavljanja paketa. Korištenje većih paketa za komunikaciju između pametnih mobilnih uređaja u vozilima moguće je do udaljenosti od 100 m uz vrlo male gubitke i vrlo malo vrijeme odziva. Na većim se udaljenostima značajno povećavaju gubici paketa i vrijeme odziva, a na udaljenostima većim od 200 m komunikacija s velikim paketima teško je provediva. Može se zaključiti da kvaliteta komunikacije između pametnih mobilnih uređaja u vozilima značajno ovisi o veličini paketa i udaljenosti između vozila. S povećanjem udaljenosti između vozila i veličine paketa gubitak paketa i kašnjenja se značajno povećavaju što loše utječe na mrežne performanse.

5.6.2. VANET eksperiment

Na slici 5.10 prikazane su prosječne vrijednosti rezultata iz VANET eksperimenta. Da bi se dokazala upotrebljivost predložene metode i mVANET aplikacije za evaluaciju postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila, korištena su tri standardna mjerila vrednovanja za ad-hoc mreže vozila opisana u poglavlju 5.5.3. Prosječna udaljenost rasprostiranja D_{AVG} [m] pokazuje kolika je prosječna euklidska udaljenost poruke od mjesta na kojemu je poruka nastala do automobila do kojih je dostavljena na kraju simulacije. Kao što se može vidjeti na slici 5.10 najveću prosječnu udaljenost imaju male poruke koja iznosi 143.26 m što je vrlo dobar domet s obzirom da se radi o automobilima u pokretu u okolini gradskog

naselja punog prepreka. Prosječna udaljenost srednjih i velikih poruka je podjednaka i za 10% manja u odnosu na prosječnu udaljenost malih poruka. Ovaj rezultat je u skladu s Ping-Pong eksperimentalnim rezultatima prikazanim na slici 5.9 iz kojih se može vidjeti da je PER značajno veći na većim udaljenostima za srednje i velike poruke u odnosu na male poruke. Prosječno kašnjenje dostavljanja poruka d_{AVG} [s] pokazuje prosječnu količinu proteklog vremena između trenutka generiranja nekog događaja u vozilu i slanja prve poruke o tom događaju do trenutka primanja te poruke na ostalim vozilima. Prosječno kašnjenje malih poruka u VANET eksperimentu je značajno manje u odnosu na velike poruke i iznosi 32.79 s, a kod velikih 44.89 s. Prosječno kašnjenje srednjih poruka je neuobičajeno najmanje i iznosi samo 24.88 s. Razlog tomu je vidljiv ako se pogledaju GPS lokacije nastanka srednjih poruka na različitim automobilima koje su puno bliže u odnosu na male i velike poruke i stoga su prije dostavljene. Prosječna pokrivenost mreže porukama C_{pAVG} [%] pokazuje prosječni postotak vozila do kojih su došle podatkovne poruke. Kao što se i moglo očekivati u VANET eksperimentu prosječna je pokrivenost pravilno raspodijeljena između malih, srednjih i velikih poruka i najveća je za male poruke i iznosi redom 89.58%, 77.77% i 71.79%.



Slika 5.10. Prikaz prosječnih vrijednosti mjerenih parametara u VANET eksperimentu

Iz eksperimentalnih se rezultata VANET eksperimenta može zaključiti da je predloženom metodom evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila moguće vrlo jednostavno i učinkovito korištenjem pametnih mobilnih uređaja testirati performanse protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini i tako dobiti puno vjerodostojnije rezultate u odnosu na simulacije. Ugrađeno bežično mrežno sučelje u pametnim

mobilnim uređajima u ad-hoc načinu rada pokazuje dobre performanse u smislu dometa komunikacije, gubitka paketa u mreži i vremenu odziva koje su usporedive s stvarnim uređajima OBU u okolinama naseljenih gradskih i prigradskih područja u kojima postoji mnogo prepreka.

6. ZAKLJUČAK

*„Do you realize that we could change the capacity of highway by a factor of two or three if we didn't rely on human precision on staying in the lane..
..improve body position and therefore drive a little bit closer together on a little bit narrower lanes, and do away with all traffic jams on highways!“*

prof. dr. Sebastian Thrun
Stanford University

Područje ad-hoc mreža vozila postalo je vrlo aktivno područje znanstvenih istraživanja, standardizacije i razvoja jer ima ogroman potencijal da poveća sigurnost vozila i cesta, učinkovitost prometa, kvalitetu vožnje i komfor vozača i putnika. Budući da su glavni uzroci smrti mladih osoba između 5 i 34 godine starosti prometne nesreće, smanjivanje se broja prometnih nesreća može postići implementacijom ad-hoc mreža vozila što predstavlja veliku motivaciju za istraživačku zajednicu, predstavnike vlasti i automobilsku industriju. Budući da su ad-hoc mreže vozila vrlo dinamične, postoje brojni izazovi koji se trebaju riješiti prije njihove upotrebe u stvarnom svijetu. Komunikacija je u ad-hoc mrežama vozila podložna stalnim prekidima i kašnjenjima jer često dolazi do dijeljenja mreže na manje cjeline. Učinkovito je rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila veliki izazov i upotrebljavaju se različiti pristupi za pravovremeno propagiranje hitnih informacija, pokrivanje velikog geografskog područja, omogućavanje učinkovite komunikacije u mrežama s malom gustoćom prometa i sprječavanje širenja nebitnih informacija.

U prvom izvornom znanstvenom doprinosu razvijen je i implementiran hibridni algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila koji kombinira V2V i SCF komunikacijske modele. U okolinama s gustim prometom koristi se unaprijeđeni V2V model komunikacije koji se sastoji od dvije metode koje inteligentno upravljaju rasprostiranjem poruka tako što određuju koji će čvorovi proslijediti poruke i na taj se način znatno smanjuje broj zalihosnih poruka i opterećenje mreže te se smanjuju kašnjenja u dostavljanju poruka do ostalih vozila u mreži. Kada gustoća prometa na cestama postane vrlo mala, dolazi do dijeljenja mreže i prekida u komunikaciji. Tada dolazi do promjene komunikacijskog modela iz V2V u SCF kojim se povećava pokrivenost mreže i sprječava se gubitak važnih poruka uzrokovan prekidima i dijeljenjima mreže. Provedene su opsežne simulacije i vrednovanje algoritma te je dokazana njegova učinkovitost u smislu smanjivanja kašnjenja i opterećenja mreže te povećanja pokrivenosti mreže porukama.

U drugom izvornom znanstvenom doprinosu uspješno je unaprijeđena učinkovitost rasprostiranja poruka u scenarijima s malom gustoćom prometa na cestama korištenjem parkiranih vozila. Proučavanjem opširne studije parkiranja zaključeno je da su vozila parkirana u prosjeku više od 23 sata na dan i da se parkirana vozila nalaze u velikom broju na malom prostoru, dugotrajno borave na istom mjestu, imaju široku raspodjelu i nalaze se na specifičnim i unaprijed poznatim lokacijama. Navedene karakteristike omogućavaju bolju optimizaciju i učinkovitije korištenje mrežnih resursa od vozila koja se kreću na cestama. Nadalje, parkirana vozila sudjeluju u rasprostiranju poruka kao statički čvorovi u V2V komunikaciji i zbog toga mogu služiti kao privremena zamjena za infrastrukturu. Rezultati simulacija pokazuju da V2PV model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem čak i malog broja parkiranih vozila značajno unaprijeđuje učinkovitost rasprostiranja poruka u scenarijima s rijetkim prometom na cestama tako što povećava pokrivenost mreže porukama, prosječni domet poruka i znatno smanjuje kašnjenja u dostavljanju poruka. Nakon početka primjene ad-hoc mreža vozila u stvarnom svijetu, veliki izazov u korištenju parkiranih vozila u komunikaciji bit će motiviranje vozača da dozvole rad uređaja OBU koji troše akumulator nakon što se vozila ugase.

Treći izvorni znanstveni doprinos rješava problem testiranja i vrednovanja aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u stvarnom svijetu. Testiranje performansi razvijenih protokola i aplikacija uobičajeno se vrši korištenjem različitih simulatora ad-hoc mreža vozila, no kako bi rezultati bili vjerodostojni, potrebno je testirati performanse u stvarnom okruženju što je trenutno skupo i zahtjevno. Stoga je razvijena metoda koja koristi pametne mobilne uređaje u ad-hoc načinu rada kao čvorove u ad-hoc mrežama vozila koji emuliraju OBU uređaje u vozilima. Za implementaciju, testiranje, prikupljanje eksperimentalnih rezultata i vrednovanje protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini razvijen je okvir u kojemu je ključna komponenta mVANET mobilna aplikacija otvorenog izvornog koda koja je dostupna svima za korištenje i testiranje. Iz eksperimentalnih se rezultata može zaključiti da se kvalitetna komunikacija između pametnih mobilnih uređaja u vozilima i dobre mrežne performanse u smislu dometa komunikacije, gubitka paketa u mreži i vremenu odziva mogu ostvariti prilikom razmjene malih paketa. S povećanjem udaljenosti između vozila i veličine paketa gubitak paketa i kašnjenja se značajno povećavaju što loše utječe na mrežne performanse. Budući da je najveći komunikacijski domet pametnih mobilnih uređaja u vozilima manji od komunikacijskog dometa OBU uređaja, predložena metoda evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila pogodna je za testiranje aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u scenariju naseljenih gradskih i prigradskih područja.

Izazovi koji će se pojaviti u području ad-hoc mreža vozila u skoroj budućnosti su: ugradnja uređaja OBU za komunikaciju u većinu vozila, korištenje infrastrukture mobilnih operatera i za komunikaciju pomoću 3G/LTE mreže, standardizacija protokola za ad-hoc mreže vozila, opsežna testiranja različitih protokola i aplikacije na većem broju vozila u stvarnim okolinama itd. Još je jedan veliki izazov stavljen pred istraživačku zajednicu, a sociološke je prirode. Naime, korisnici bi mogli smatrati da je s uvođenjem komunikacijske tehnologije u njihova vozila ugrožena njihova privatnost te da ih je moguće pratiti ili da je moguće preuzeti kontrolu nad njihovim vozilima. Trenutno brojne automobilske korporacije ulažu mnogo novca u istraživanje i razvoj što kvalitetnijih rješenja za komunikaciju između vozila te se vrlo brzo očekuje pojava uređaja OBU u vozilima i ad-hoc mrežama vozila na cestama. Budući da je DSRC otvorena platforma, sva će vozila bez obzira na tip i marku moći međusobno komunicirati. Učinkovitost bi ad-hoc mreža vozila bila još veća kada bi se u komunikaciju uključili pješaci, biciklisti i motoristi i zbog toga je iznimno važno razviti inovativna rješenja da bi se i oni aktivno uključili u komunikaciju u ad-hoc mrežama vozila.

LITERATURA

- [1] A.U.H. Yasar, "Context-Aware Communication in Large Scale Vehicular Ad-Hoc Networks: Concepts, Methods and Applications", *LAP Lambert Academic Publishing*, Germany, 2012.
- [2] K. Paridel, T. Mantadelis, A.U.H. Yasar, D. Preuveneers, G. Janssens, Y. Vanrompay, and Y. Berbers, "Analyzing the efficiency of context-based grouping on collaboration in vanets with large-scale simulation," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 3, pp. 1–16, May 2012.
- [3] K. Paridel, A.-U.-H. Yasar, Y. Vanrompay, D. Preuveneers, Y. Berbers, "Teamwork on the road: Efficient collaboration in VANETs with context-based grouping", *Procedia Computer Science*, volume 5, pp. 48-57, Niagara Falls, Canada, 2011.
- [4] A.U.H. Yasar, K. Paridel, D. Preuveneers, Y. Berbers, "When efficiency matters: Towards quality of context-aware peers for adaptive communication in VANETs", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1004-1010, Baden-Baden, Germany, 2011.
- [5] A.U.H. Yasar, N. Naeem, D. Preuveneers, Y. Berbers, "End-to-end communication modelling for large scale vehicular networks using AADL", *Research communications*, pp. 41-48, Kaunas, Lithuania, 2011.
- [6] A.U.H. Yasar, D. Preuveneers, Y. Berbers, "Evaluation framework for adaptive context-aware routing in large scale mobile peer-to-peer systems", *Peer-to-Peer Networking and Applications*, volume 4, issue 1, pp. 37-49, 2011.
- [7] A.U.H. Yasar, Y. Vanrompay, D. Preuveneers, Y. Berbers, "Optimizing information dissemination in large scale mobile peer-to-peer networks using context-based grouping", *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, issue 13, pp. 1065-1071, Madeira Island, Portugal, 2010.
- [8] K. Paridel, J. Balen, Y. Berbers, G. Martinović, "VVID: A delay tolerant data dissemination architecture for VANETs using V2V and V2I communication", *The Second International Conference on Mobile Services, Resources, and Users, MOBILITY*, pp. 151-156, Venice, Italy, 2012.
- [9] J. Balen, K. Paridel, G. Martinovic, Y. Berbers, "PVCM: Assisting multi-hop communication in vehicular networks using parked vehicles", *IEEE International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT)*, pp. 1-4, Sankt Petersburg, Russia, 2012.
- [10] J. Balen, J. Matijaš, G. Martinovic, „Simulation and testing of VANET protocols“, *Tridesettreći skup o prometnim sustavima s međunarodnim sudjelovanjem Automatizacija u prometu, KoREMA*, Osijek, Croatia, pp. 5-8, 2013.
- [11] M. Conti, S. Giordano, "Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions," *IEEE Communications Magazine*, vol.52, no.1, pp.85-96, January 2014.
- [12] Intelligent Transport Systems, <http://www.etsi.org/website/technologies/intelligenttransportsystems.aspx>, s *Interneta*, studeni 2012.
- [13] Google Self-Driving Car Test, <http://www.google.com/about/careers/lifeatgoogle/self-driving-car-test-steve-mahan.html>, s *Interneta*, lipanj 2014.
- [14] J.F. Jardim, "A Vehicular Ad Hoc Network Architecture with Geographical Routing Proposal", Magistarski rad, Technical University of Lisbon, listopad 2012.
- [15] T. Hendrickx, "A hybrid data dissemination protocol for vehicular networks combining flooding and store-carry-forward routing", *Master paper*, KU Leuven, 2013.

- [16] K. Ramachandran, M. Gruteser, R. Onishi, T. Hikita, "Experimental analysis of broadcast reliability in dense vehicular networks", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.2, no.4, pp.26-32, December 2007.
- [17] O.K. Tonguz, N. Wisitpongphan, J.S. Parikh, B. Fan, P. Mudalige, V.K. Sadekar, "On the Broadcast Storm Problem in Ad hoc Wireless Networks", *In 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems (BROADNETS)*, pp.1-11, October 2006.
- [18] N. Wisitpongphan, O.K. Tonguz, J.S. Parikh, P. Mudalige, F. Bai, V. Sadekar, "Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks", *IEEE Wireless Communications*, vol.14, no.6, pp.84-94, December 2007.
- [19] C. Sommer, "Car-to-X Communication in Heterogeneous Environments", *PhD Thesis (Dissertation)*, Department of Computer Science, University of Erlangen, June 2011.
- [20] C. Sommer, R.German and F. Dressler, "Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10 (1), pp. 3-15, January 2011.
- [21] A. Varga, R. Hornig, "An overview of the OMNeT++ simulation environment", *In Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, Brussels, Belgium, pp. 1-10, 2008.
- [22] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, C. Rössel, P. Wagner, "SUMO (Simulation of Urban MObility); An open-source traffic simulation," *In 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM 2002)*, pp. 183–187, United Arab Emirates, September 2002.
- [23] M. Baguena, S.M. Tornell, A. Torres, C.T. Calafate, J.-C. Cano, P. Manzoni, "VACaMobil: VANET Car Mobility Manager for OMNeT++", *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pp. 1057,1061, 9-13 June 2013
- [24] M. Haklay and P. Weber, "OpenStreetMap: User-Generated Street Maps," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 12–18, October 2008.
- [25] S. Krauss, "Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics," *PhD Thesis*, University of Cologne, 1998.
- [26] C. Sommer, D.Eckhoff, F. Dressler, "IVC in Cities: Signal Attenuation by Buildings and How Parked Cars Can Improve the Situation", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 99, pp. 1-13, 2013
- [27] L. Junliang, Y. Zheng, I. Stojmenovic, "Receiver Consensus: On-time Warning Delivery for Vehicular Ad-hoc Networks", *IEEE 32nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp.386-395, June 2012.
- [28] I. Stojmenovic, A. Khan, and N. Zaguia, "Broadcasting with seamless transition from static to highly mobile wireless ad hoc, sensor and vehicular networks", *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 27, 3, pp. 225-234, June 2012.
- [29] I. Stojmenovic, M. Seddigh, and J. Zunic, "Dominating sets and neighbor elimination-based broadcasting algorithms in wireless networks", *IEEE Transaction on Parallel Distributed Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 14-25, Jan. 2002.
- [30] F.J. Ros, P.M. Ruiz, I. Stojmenovic, "Acknowledgment-Based Broadcast Protocol for Reliable and Efficient Data Dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.11, no.1, pp.33,46, Jan. 2012.
- [31] M. Li, K. Zeng, and W. Lou, "Opportunistic broadcast of emergency messages in vehicular ad hoc networks with lossy links", *Computer Networks*, vol. 55, no. 10, pp. 2443-2464, Jul. 2011.

- [32] A. Amoroso, G. Mara, and M. Rocchetti, "Going realistic and optimal: A distributed multi-hop broadcast algorithm for vehicular safety", *Computer Networks*, vol. 55, pp. 2504-2519, July 2011.
- [33] M. van Eenennaam, W.K. Wolterink, G. Karagiannis, G. Heijenk, "Exploring the solution space of beaconing in VANETs," *In First IEEE Vehicular Networking Conference, VNC2009*, pp.1-8, Tokyo, Japan, October 2009.
- [34] R. Fracchia, M. Meo and D. Rossi, "VANETs: To Beacon or Not To Beacon", *In Autonet'06 Workshop at IEEE Globecom*, San Francisco, USA, November 2006.
- [35] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenges", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 8, no. 1, pp. 24–37, 2006.
- [36] S. Merugu et al., "Routing in Space and Time in Networks with Predicable Mobility", *Technical Report*, Georgia Institute of Technology, GIT-CC-04-7, 2004.
- [37] R. Handorean et al., "Accommodating Transient Connectivity in Ad Hoc and Mobile Settings," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3001, pp. 305-322, March 2004.
- [38] S. Jain, K. Fall, R. Patra, "Routing in a delay tolerant network", *Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, 34, 4, pp. 145-158, August 2004.
- [39] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partiallyconnected ad hoc networks", *Technical Report*, pp. 103-116, Duke University, CS-200006, April 2000.
- [40] M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 10, no. 4, pp. 477–486, Aug. 2002.
- [41] D. Nain, N. Petigara, and H. Balakrishnan, "Integrated routing and storage for messaging applications in mobile ad hoc networks," *Mobile Network Applications*, vol. 9, no. 6, pp. 595–604, December 2004.
- [42] F. Tchakountio and R. Ramanathan, "Tracking highly mobile endpoints", *In Proceedings of the 4th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia*, pp. 83–94, New York, USA, 2001.
- [43] M. Musolesi, S. Hailes, and C. Mascolo, "Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks," *In Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks*, pp. 183–189, Washington, USA, 2005.
- [44] C.C. Shen, G. Borkar, S. Rajagopalan, and C. Jaikaeo, "Interrogation-based relay routing for ad hoc satellite networks", *In IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM*, vol. 3, pp. 2920 – 2924, November 2002.
- [45] Z. D. Chen, H. Kung, and D. Vlah, "Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways," *In Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 247–250, New York, USA, 2001.
- [46] S. Dolev, S. Gilbert, N. A. Lynch, E. Schiller, A. A. Shvartsman, and J. L. Welch, "Virtual mobile nodes for mobile ad hoc networks", *In DISC04*, pp. 230–244, 2004.
- [47] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," *In IEEE SNPA Workshop*, pp. 30–41, 2003.
- [48] S. Jain, M. Demmer, R. Patra, and K. Fall, "Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network," *In Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 109–120, New York, USA, ACM, 2005,

- [49] Y. Wang, S. Jain, M. Martonosi, and K. Fall, "Erasurecoding based routing for opportunistic networks", *In Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pp. 229–236, New York, USA, 2005.
- [50] P. Yang and M. Chuah, "Efficient interdomain multicast delivery in disruption tolerant networks", *The 4th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Networks*, 2008. MSN 2008, pp. 81–88, 2008.
- [51] J. Zhao, Y. Zhang, and G. Cao, "Data pouring and buffering on the road: A new data dissemination paradigm for vehicular ad hoc networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 3266–3277, 2007.
- [52] J. Zhao and G. Cao, "Vadd: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 1910–1922, 2008.
- [53] O. Tonguz, N. Wisitpongphan, and F. Bai, "Dv-cast: A distributed vehicular broadcast protocol for vehicular ad hoc networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 47–57, 2010.
- [54] R. S. Schwartz, R. R. R. Barbosa, N. Meratnia, G. Heijenk, and H. Scholten, "A directional data dissemination protocol for vehicular environments," *Computer Communications*, vol. 34, no. 17, pp. 2057–2071, Nov. 2011.
- [55] P.-C. Cheng, K. C. Lee, M. Gerla, and J. Harri, "Geodtn+nav: Geographic dtn routing with navigator prediction for urban vehicular environments," *Mobile Networks and Applications*, vol. 15, no. 1, pp. 61–82, 2010.
- [56] S.A. Bitaghsir, F. Hendessi, "An intelligent routing protocol for delay tolerant networks using genetic algorithm", *11th International Conference Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN*, vol. 6869, pp. 335–347, Springer, 2011.
- [57] V. Soares, J. Rodrigues, and F. Farahmand, "Geospray: A geographic routing protocol for vehicular delay-tolerant networks," *Information Fusion 15*, pp. 102-113, January 2014.
- [58] M. Artimy, "Local density estimation and dynamic transmission-range assignment in vehicular emphasis emphasistype", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 400–412, 2007.
- [59] M. Bhuiyan, S. Salim, and M. Hasan, "Density aware broadcasting scheme for vanet", *17th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pp. 467–471, 2011.
- [60] S. Panichpapiboon, W. Pattara-atikom, "Evaluation of a neighbor-based vehicle density estimation scheme," *In 8th IEEE International Conference on ITS Telecommunications*, pp. 294–298. 2008.
- [61] M. Slavik and I. Mahgoub, "On the scalability of wireless multi-hop broadcast protocols with respect to density in vanet," *2011 International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT)*, pp. 92 –95, March 2011.
- [62] K. Paridel, *Communication Middleware for Mobile Ad hoc Networks: Algorithms for Highly Mobile and Partitioned Networks*, Ph.D. Thesis, September 2013.
- [63] R. Galić, "Vjerojatnost i statistika", *Elektrotehnički fakultet Osijek*, 2004.
- [64] Area of Overlapping Circles, <http://jwilson.coe.uga.edu/EMAT6680Su12/Carreras/EMAT6690/Essay2/essay2.html>, s *Interneta*, s *Interneta*, svibanj 2014.
- [65] K. Wessel, M. Swigulski, A. Kopke, D. Willkomm, "MiXiM – The Physical Layer: An Architecture Overview," *in 2nd ACM/ICST International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools 2009)*, ACM, pp. 1–8, Rome, Italy, March 2009.

- [66] D. Eckhoff, C. Sommer, R. German, and F. Dressler, "Cooperative awareness at low vehicle densities: How parked cars can help see through buildings," *In IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, pp. 1–6, 2011.
- [67] N. Liu, M. Liu, W. Lou, G. Chen, and J. Cao, "Pva in vanets: Stopped cars are not silent," *In Proceedings IEEE INFOCOM*, pp. 431–435, April 2011.
- [68] J. Harri, F. Filali, C. Bonnet, and M. Fiore, "VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs," *In Proc. of VANET'06. ACM*, pp. 96–97, New York, USA, 2006.
- [69] N. Liu, M. Liu, G. Chen, and J. Cao, "The sharing at roadside: Vehicular content distribution using parked vehicles," *In Proceedings IEEE INFOCOM*, pp. 2641–2645, March 2012.
- [70] F. Malandrino, C. Casetti, C. Chiasserini, C. Sommer, and F. Dressler, "Content downloading in vehicular networks: Bringing parked cars into the picture", *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 5, Sydney, Australia, September 2012.
- [71] Kimley-Horn and Associates, "Old town area parking study, final report," <http://www.alexandriava.gov/uploadedFiles/localmotion/ExistingParkingConditions.pdf>, *s Interneta*, February 2010.
- [72] F. Ahmed-Zaid, F. Bai, S. Bai, and et al., "Vehicle safety communications – applications (vsc-a) final report: Appendix volume 2 communications and positioning", <http://www.nhtsa.gov/DOT/NHTSA/NVS/Crash%20Avoidance/Technical%20Publications/2011/811492C.pdf>, *s Interneta*, September 2011.
- [73] F. Bai, B. Krishnamachari, "Exploiting the wisdom of the crowd: localized, distributed information-centric vanets," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 138–146, 2010.
- [74] SimTD, Safe and Intelligent Mobility, Test Filed Germany, <http://www.simtd.de/>, *s Interneta*, lipanj 2014.
- [75] J.C. Herrera, et al., "Evaluation of Traffic Data Obtained via GPS-Enabled Mobile Phones: The Mobile Century Field Experiment," *Transportation Research Part C*, Vol. 18, No. 4, pp. 568-583, 2010.
- [76] S. Busanelli, F. Rebecchi, M. Picone, N. Iotti, G. Ferrari, "Cross-Network Information Dissemination in Vehicular Ad hoc Networks (VANETs): Experimental Results from a Smartphone-Based Testbed", *Future Internet*, 5, pp. 398-428, 2013.
- [77] D. Sawada, M.Sato, K. Uehara, J. Murai, "iDANS: A platform for disseminating information on a VANET consisting of smartphone nodes," *11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, pp.252-257, 23-25 Aug. 2011.
- [78] K.C. Su, H.M. Wu, W.L. Chang, Y.H. Chou, "Vehicle-to-Vehicle Communication System through Wi-Fi Network Using Android Smartphone", *International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, pp.191-196, 2012.
- [79] Gartner Says Worldwide Traditional PC, Tablet, Ultramobile and Mobile Phone Shipments, <http://www.gartner.com/newsroom/id/2645115>, *s Interneta*, lipanj 2014.
- [80] M.C. Chen, J.L. Chen, T.W. Chang, "Android/OSGi-based vehicular network management system", *Computer Communications*, 34, 2, pp. 169-183, February 2011.
- [81] Android SDK, developer.android.com/sdk, *s Interneta*, lipanj 2014.
- [82] Cyanogenmod, <http://www.cyanogenmod.com>, *s Interneta*, lipanj 2014.
- [83] J. Thomas, J. Robble, N. Modly, "Off Grid communications with Android Meshing the mobile world", *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp.401-405, 13-15 November 2012.

- [84] SPAN - Android Manet Manager, <https://github.com/ProjectSPAN/android-manet-manager>, *s Interneta*, srpanj 2014.
- [85] Android VANET Smartphone Experiment, <https://github.com/mVANET/android-vanet-sex>, *s Interneta*, srpanj 2014.

POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Inteligentni transportni sustavi [12]</i>	10
<i>Slika 2.2. Protokoli usmjeravanja u ad-hoc mrežama vozila</i>	12
<i>Slika 2.3. Prikaz komunikacije u ad-hoc mrežama vozila</i>	16
<i>Slika 3.1. Princip jednostavnog poplavlivanja mreže porukama</i>	22
<i>Slika 3.2. Klasično poplavlivanje porukama u ad-hoc mreži vozila [15]</i>	23
<i>Slika 3.3. Utjecaj oluje razasijanja na mrežne performanse u 1D okolini prema [19] i rezultatima iz [17] i [18]</i>	24
<i>Slika 3.4. Vjerojatnost razasijanja poruke u ovisnosti o gustoći prometa</i>	26
<i>Slika 3.5. Prosječno kašnjenje po poruci za različite vrijednosti vjerojatnosti razasijanja poruka</i>	28
<i>Slika 3.6. Ukupan broj razasijanih poruka po vozilu za različite vrijednosti vjerojatnosti razasijanja poruke</i>	29
<i>Slika 3.7. Prosječna pokrivenost mreže za različite vrijednosti vjerojatnosti razasijanja poruka</i>	30
<i>Slika 3.8. Načelo dinamičnog razasijanja poruke za sprječavanje oluje razasijanja na temelju određivanja udaljenosti između čvorova ili jačine primljenog signala</i>	31
<i>Slika 3.9. Primjer rada protokola ReC u 2D okolini [20]</i>	35
<i>Slika 3.10. Klasično poplavlivanje porukama u kojem sudjeluju svi čvorovi</i>	38
<i>Slika 3.11. Razasijanje poruka pametnim odabirom razasijaljača</i>	38
<i>Slika 3.12. Prosječna pokrivenost mreže za različite beacon intervale</i>	41
<i>Slika 3.13. Prosječno kašnjenje po poruci u mreži za različite beacon intervale</i>	41
<i>Slika 3.14. Prosječan domet poruke u mreži za različite beacon intervale</i>	42
<i>Slika 3.15. Ukupan broj poslanih beacon poruka u mreži za različite gustoće vozila</i>	43
<i>Slika 3.16. Struktura beacon poruke</i>	44
<i>Slika 3.17. Prikaz prvog koraka metode usmjerene prema pošiljatelju u V2V modelu komunikacije</i>	45
<i>Slika 3.18. Prikaz prvog koraka metode usmjerene prema pošiljatelju u V2V modelu komunikacije s okolinom istočnih čvorova</i>	46
<i>Slika 3.19. Prikaz drugog koraka metode usmjerene prema pošiljatelju u V2V modelu komunikacije</i>	48
<i>Slika 3.20. Problem isturenih čvorova</i>	49
<i>Slika 3.21. Odabir zamjenskih čvorova</i>	49
<i>Slika 3.22. Scenarij za odabir čvorova BackUp</i>	51
<i>Slika 3.23. Najveća prijeđena udaljenost poruke s i bez BackUp metode</i>	52
<i>Slika 3.24. Prosječna pokrivenost mreže porukama s i bez BackUp metode</i>	53
<i>Slika 3.25. Prosječan domet poruke u mreži s i bez BackUp metode</i>	54
<i>Slika 3.26. Prosječno kašnjenje po poruci u mreži s i bez BackUp metode</i>	54
<i>Slika 3.27. Struktura podatkovne poruke</i>	56
<i>Slika 3.28. Način izmjene poruka u SCF modelu komunikacije [15]</i>	63
<i>Slika 3.29. Problem „starih susjeda“</i>	64
<i>Slika 3.30. Klasične metode za upravljanje spremnicima podataka</i>	65
<i>Slika 3.31. Prosječna pokrivenost mreže porukama za SCF model komunikacije</i>	66
<i>Slika 3.32. Prosječno kašnjenje po poruci u mreži za SCF model komunikacije</i>	66
<i>Slika 3.33. Vremenski intervali za mjerenje najveće prijeđene udaljenosti poruka</i>	67
<i>Slika 3.34. Ukupan broj razmijenjenih poruka po vozilu za SCF model komunikacije</i>	68
<i>Slika 3.35. Ukupan broj poslanih beacon poruka za različite beacon intervale u SCF modelu komunikacije</i>	69
<i>Slika 3.36. Fluktuacija prosječne gustoće 1-skoka susjeda kroz vrijeme</i>	73
<i>Slika 3.37. Fluktuacija prosječne gustoće 2-skoka susjeda kroz vrijeme</i>	73
<i>Slika 3.38. Promjena prosječne 1-skoka gustoće kroz vrijeme za četiri slučajna vozila</i>	74
<i>Slika 3.39. Promjena prosječne 2-skoka gustoće kroz vrijeme za četiri slučajna vozila</i>	74
<i>Slika 3.40. Prosječna gustoća 1-skoka susjeda kroz vrijeme za odabrani čvor A</i>	75
<i>Slika 3.41. Prosječna gustoća 1-skoka susjeda kroz vrijeme za odabrani čvor B</i>	76
<i>Slika 3.42. Normalizirana fluktuacija gustoće za 1-skok i 2-skok metode</i>	77

<i>Slika 3.43. Određivanje površine za brojanje 2-skop susjeda</i>	78
<i>Slika 3.44. Određivanje površine kružnice koja nije zajednička objema kružnicama</i>	78
<i>Slika 3.45. Dometi četiri 1-skop susjeda koji su smješteni na idealnom geografskom položaju</i>	83
<i>Slika 3.46. Domet četiri 1-skop susjeda koja su udaljena najviše $R/2$ od izvornog čvora</i>	83
<i>Slika 3.47. Dijagram toka algoritma za učinkovito rasprostiranje poruka u pokretnim mrežama vozila zasnovan na njihovom trenutnom položaju</i>	86
<i>Slika 3.48. Usporedba prosječne pokrivenosti mreže porukama GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije</i>	89
<i>Slika 3.49. Usporedba prosječnog kašnjenja u dostavljanju poruka GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije</i>	90
<i>Slika 3.50. Usporedba prosječnog dometa poruka GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije</i>	92
<i>Slika 3.51. Usporedba najveće prijeđene udaljenosti poruka za LD gustoću prometa GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije</i>	93
<i>Slika 3.52. Usporedba najveće prijeđene udaljenosti poruka za MD gustoću prometa GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije</i>	94
<i>Slika 3.53. Usporedba najveće prijeđene udaljenosti poruka za HD gustoću prometa GEO-VS algoritma sa SCF i V2V-SRBR modelima komunikacije</i>	94
<i>Slika 4.1. Domet signala OBU uređaja u gradskim područjima</i>	97
<i>Slika 4.2. Prikaz zauzetosti parkirnih mjesta tijekom popodneva radnog dana u Old Town Alexandria [71]</i>	101
<i>Slika 4.3. Scenarij 1: Prikaz prometa tijekom noći i za vrijeme male gustoće</i>	104
<i>Slika 4.4. Scenarij 2: Prikaz prometa u prigradskim područjima</i>	104
<i>Slika 4.5. Scenarij 3: Prikaz blokiranja signala zbog prepreka u gradskim okolinama</i>	105
<i>Slika 4.6. Prikaz podzemne garaže u kojoj je blokiran signal s ceste</i>	106
<i>Slika 4.7. Model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem vozila u mirovanju</i>	107
<i>Slika 4.8. Domet signala komunikacije u Scenariju 3</i>	109
<i>Slika 4.9. Prikaz dometa signala u obliku elipse u Scenariju 3</i>	110
<i>Slika 4.10. Karta grada Leuvena (Belgija) korištena u simulacijama u disertaciji</i>	111
<i>Slika 4.11. Usporedba prosječnih pokrivenosti mreže porukama P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma</i>	113
<i>Slika 4.12. Usporedba prosječnog kašnjenja u dostavljanju poruka P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma</i>	114
<i>Slika 4.13. Usporedba prosječnog dometa poruka P1D, P2D i P3D modela učinkovitog rasprostiranja poruka i GEO-VS algoritma</i>	115
<i>Slika 4.14. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 50 vozila na cestama</i>	116
<i>Slika 4.15. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 100 vozila na cestama</i>	117
<i>Slika 4.16. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 200 vozila na cestama</i>	117
<i>Slika 4.17. Usporedba najvećih prijeđenih udaljenosti poruka kroz vrijeme za gustoću prometa od 300 vozila na cestama</i>	118
<i>Slika 5.1. Grafički prikaz X-NETAD rasprostiranja podataka u mreži [76]</i>	122
<i>Slika 5.2. Prikaz ad-hoc mreže vozila korištenjem pametnih mobilnih uređaja</i>	126
<i>Slika 5.3. Arhitektura okvira za implementaciju, testiranje, prikupljanje eksperimentalnih rezultata i vrednovanje različitih protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini</i>	129
<i>Slika 5.4. Grafičko sučelje VANET komponente</i>	131
<i>Slika 5.5. Grafičko sučelje Ping-Pong komponente</i>	133
<i>Slika 5.6. Struktura VANET komponente</i>	134
<i>Slika 5.7. Osnovna struktura beacon i podatkovnih poruka</i>	135

<i>Slika 5.8. Karta gradskog naselja u kojem je proveden VANET eksperiment</i>	<u>143</u>
<i>Slika 5.9. Prikaz Ping-Pong PER-a ovisno o udaljenosti između uređaja za različite veličine paketa</i>	<u>144</u>
<i>Slika 5.10. Prikaz prosječnih vrijednosti mjerenih parametara u VANET eksperimentu</i>	<u>147</u>

POPIS TABLICA

<i>Tablica 2.1. Standardi DSRC-a u Japanu, Europi i SAD-u</i>	11
<i>Tablica 2.2. Podjela usluga i aplikacija u ad-hoc mrežama vozila</i>	18
<i>Tablica 3.1. Simulacijske postavke korištene u doktorskoj disertaciji</i>	27
<i>Tablica 3.2. Struktura za pohranjivanje informacija o 1-skok susjedima</i>	39
<i>Tablica 3.3. Najveća prijeđena udaljenost poruke u vremenu za LD gustoću vozila [m]</i>	67
<i>Tablica 3.4. Najveća prijeđena udaljenost poruke u vremenu za MD gustoću vozila [m]</i>	68
<i>Tablica 3.5. Najveća prijeđena udaljenost poruke u vremenu za HD gustoću vozila [m]</i>	68
<i>Tablica 3.6. Simulacijske postavke za mjerenje gustoće prometa</i>	72
<i>Tablica 3.7. Prikaz količine zalihosnih poruka u mreži za V2V-SRBR model komunikacije i GEO-VS algoritam</i>	91
<i>Tablica 3.8. Prikaz količine razmijenjenih poruka u SCF načinu rada za SCF model komunikacije i GEO-VS algoritam</i>	91
<i>Tablica 5.1. Osnovne karakteristike metode evaluacije postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini ad-hoc mreža vozila</i>	128
<i>Tablica 5.2. Opis parametara za vrednovanje različitih postupaka rasprostiranja poruka u stvarnoj okolini mreža vozila</i>	138
<i>Tablica 5.3. Osnovne specifikacije Samsung S3 uređaja korištenog u eksperimentima</i>	140
<i>Tablica 5.4. Vrijeme odziva (srednje, minimalno i maksimalno) u ovisnosti o udaljenosti između uređaja za različite veličine paketa [ms]</i>	145

POPIS ALGORITAMA

<i>Algoritam 3.1. Algoritam za razaslanje poruka sa statičnom vjerojatnošću</i>	26
<i>Algoritam 3.2. Algoritam za odabir četiri najbolja razaslijača</i>	46
<i>Algoritam 3.3. Algoritam za odabir tri najbolja razaslijača u drugom koraku prve metode</i>	47
<i>Algoritam 3.4. Algoritam za provjeru uvjeta BackUp čvorova</i>	50
<i>Algoritam 4.1. Algoritam za prepoznavanje Scenarija 3 i uključivanje parkiranih vozila u komunikaciju</i>	109

SAŽETAK

Ova disertacija istražuje načine učinkovitog rasprostiranja poruka u ad-hoc mrežama vozila kako bi se postiglo pravovremeno rasprostiranje hitnih poruka, pokrivanje velikog geografskog područja, učinkovita komunikacija u situacijama s malom gustoćom prometa i sprječavanje širenja zalihosnih poruka. Ad-hoc mreže vozila imaju vrlo dinamičnu mrežnu topologiju zbog konstantnog i brzog kretanja vozila. To zahtijeva inovativne pristupe i metode u rješavanju problema u komunikaciji. U disertaciji je predstavljen algoritam za učinkovito rasprostiranje poruka u ad-hoc mrežama vozila korištenjem V2V i SCF modela komunikacije koji na temelju geografskog položaja vozila i lokalne gustoće prometa smanjuje kašnjenja i broj zalihosnih poruka te povećava pokrivenost mreže. Za scenarije s malom gustoćom prometa na cestama izrađen je model učinkovitog rasprostiranja poruka korištenjem parkiranih vozila koja imaju visoki stupanj vremenske i prostorne pravilnosti te poboljšavaju komunikaciju i pokrivenost u ad-hoc mrežama vozila u okolinama gradskih područja s rijetkim prometom i brojnim preprekama. Da bi vrednovanje performansi različitih aplikacija i protokola za ad-hoc mreže vozila u stvarnom svijetu bilo jednostavnije i pristupačno, razvijena je metoda za vrednovanje temeljena na korištenju pametnih mobilnih uređaja. Za implementaciju, testiranje, prikupljanje eksperimentalnih rezultata i vrednovanje protokola i aplikacija za ad-hoc mreže vozila u stvarnoj okolini razvijen je okvir u kojemu je ključna komponenta mVANET mobilna aplikacija otvorenog izvornog koda koja je dostupna svima za korištenje i testiranje.

Ključne riječi: ad-hoc mreže vozila, pametni mobilni uređaji, parkirana vozila, rasprostiranje poruka, V2V, V2I, SCF model komunikacije, VANET.

ABSTRACT

Efficient messages dissemination in vehicular ad-hoc networks based on their position

This doctoral thesis explores methods for efficient message dissemination in VANETs in order to achieve the timely propagation of urgent information, coverage of a large geographical area, efficient communication in sparse networks and to prevent the propagation of redundant messages. VANETs have highly dynamic network topology due to the constant and rapid movement of vehicles. This requires an innovative approaches and methods for solving communication problems. In doctoral thesis, an algorithm for efficient message dissemination in VANETs, using V2V and SCF communication models that based on a vehicle geographic location and local traffic density reduces delays and number of redundant messages and increases network coverage, is presented. For scenarios with low traffic density on the roads, efficient message dissemination model based on using parked vehicles, is developed. Parked vehicles have a high degree of temporal and spatial regularity and they enhance communication and network coverage in VANETs in urban areas with sparse traffic and obstacles. In order to enable simpler and inexpensive evaluation of various VANETs applications and protocols in a real world, an evaluation method based on using smartphones is developed. For implementation, testing, experimental results collection and evaluation of applications and protocols in a real world a framework is developed. A key component of developed framework is an open source mVANET mobile application available for everyone for using and testing.

Keywords: vehicular ad-hoc network, smartphones, parked vehicles, message dissemination, V2V, V2I, SCF communication models, VANET.

ŽIVOTOPIS

Josip Balen, asistent na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, rođen je 5. travnja 1983. godine u Đakovu gdje završava osnovnu školu i opću gimnaziju. Diplomirao je u siječnju 2008. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. U studenom 2005. godine zapošljava se u Đakovu u učilištu Memoria. Od siječnja do prosinca 2008. godine radi kao programer u Privrednoj banci Zagreb, a od prosinca 2008. godine zaposlen je kao asistent na Zavodu za programsko inženjerstvo na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku na kojemu pohađa i Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike, smjer Komunikacije i informatika. Jedan je od glavnih pokretača IPA IV projekta Europske unije na kojemu je radio od listopada 2012. do rujna 2013. godine. Od studenog 2013. godine voditelj je IEEE projekta za izradu mobilnih aplikacija pod nazivom IEEEmadC. Glavno područje njegovog znanstvenog i stručnog interesa su ad-hoc mreže vozila VANETs (engl. Vehicular Ad-Hoc Networks) s naglaskom na učinkovito rasprostiranje poruka među vozilima te testiranje protokola u stvarnom svijetu uz podršku mobilnih tehnologija. Krajem 2011. godine započinje suradnju sa Zavodom za računarstvo na Katholieke Universiteit Leuven u Belgiji na kojemu je boravio tri puta u istraživačkom posjetu u sklopu Erasmus mobilnosti. Kao autor i suautor objavio je tri znanstvena rada u časopisima (od toga jedan u CC) i osam u zbornicima međunarodnih konferencija te jednu autorsku knjigu. Od 2010. godine predsjednik je IEEE Studentskog ogranka Osijek, a od 2012. studentski ambasador IEEE Computer Society za Regiju 8 i član IEEE izvršnog odbora Hrvatske sekcije. Sudjelovao je na brojnim kraćim stručnim boravcima i IEEE Student Branch kongresima u cijeloj Europi. Dva je puta (2012. i 2013.) osvojio Richard E. Merwin nagradu IEEE Computer Societya, a 2014. godine osvojio je najprestižniju IEEE nagradu za studente pod nazivom „IEEE Larry K. Wilson Award“. Posjeduje čin vatrogasnog dočasnika te je 2001. dobio brončanu vatrogasnu plamenicu za hrabrost i požrtvovnost. Otac je prekrasne devetogodišnje kćeri Filipe.

Josip Balen

Prilog I

```
/* VANETBeaconBroadcastTimerTask */
private class VANETBeaconBroadcastTimerTask extends TimerTask {

    public void run() {

        // Generiranje ID beacon poruke
        int nextBeaconId = app.generateNextVANETMessageID();

        // Kreiranje beacon strukture podataka
        final VANETMessage bmsg = new VANETMessage();
        bmsg.setStringAddressSource(hostAddress);
        bmsg.setLatitude(currentLocation.getLatitude());
        bmsg.setLongitude(currentLocation.getLongitude());
        bmsg.setType(VANETMessage.TYPE_BEACON);
        bmsg.setMessageId(nextBeaconId);
        bmsg.setStringAddressDestination(app.manetcfg.getIpBroadcast());
        bmsg.setIncoming(false);

        // Serijalizacija strukture podataka u sekvencu bajtova
        parcel = Parcel.obtain();
        bmsg.writeToParcel(parcel, 0);
        byte buff[] = parcel.marshall();

        // Kreiranje i slanje UDP paketa
        DatagramPacket packet = new DatagramPacket(buff, buff.length,
            InetAddress.getByName(bmsg.getStringAddressDestination()),
            VANETServiceBase.BEACONS_UDP_RX_PORT);
        socket.send(packet);

    }
}
```

Programski kod P1. Klasa za periodno razaslanje *beacon* poruka

```

/* VANETBeaconListenerThread */
private class VANETBeaconListenerThread extends Thread {

    public void run() {
        // Inicijalizacija spremnika bajtova za primanje UDP paketa
        byte[] buff = new byte[VANETServiceBase.UDP_MAX_PACKET_SIZE];
        DatagramPacket packet;

        while (running == true) {

            // Primanje UDP paketa
            packet = new DatagramPacket(buff, buff.length);
            socket.receive(packet); // blokira dok neki paket nije
            primljen

            // Deserijalizacija primljenih bajtova
            Parcel parcel = Parcel.obtain();
            parcel.unmarshall(packet.getData(), packet.getOffset(),
            packet.getLength());
            parcel.setDataPosition(0);

            final VANETMessage
            msg=VANETMessage.CREATOR.createFromParcel(parcel);

            msg.setStringAddressSource(packet.getAddress().getHostAddress());
            msg.setStringAddressDestination(hostAddress);
            msg.setIncoming(true);

            // Računanje udaljenosti od susjeda
            float[] distanceResult = new float[1];
            Location.distanceBetween(currLoc.getLatitude(),
            currLoc.getLongitude(), msg.getLatitude(),
            msg.getLongitude(), distanceResult);

            // Daljnje procesiranje primljene beacon poruke ...

        }
    }
}

```

Programski kod P2. Klasa za primanje *beacon* poruka

```

/* VANETBeaconBroadcastTimerTask */
private class VANETMessageSendingThread extends Thread {

    private Queue<VANETMessage> messageQueue;

    // ...

    public void sendMessage(VANETMessage msg) {
        // ...
        // Upisivanje VANETMessage strukture podataka u red za slanje
        messageQueue.offer(msg);
    }

    // ...

    public void run() {

        while(running) {
            // Čitanje VANETMessage strukture podataka iz reda za slanje
            VANETMessage msg = messageQueue.poll();

            // Serijalizacija strukture podataka
            parcel = Parcel.obtain();
            msg.writeToParcel(parcel, 0);
            final byte buffMessage[] = parcel.marshall();

            // Razašiljanje UDP paketa
            DatagramPacket packet = new DatagramPacket(buffMessage,
            buffMessage.length,
            InetAddress.getByName(msg.getStringAddressDestination()),
            VANETServiceBase.DATA_UDP_RX_PORT);
            socket.send(packet);
        }
    }
}

```

Programski kod P3. Klasa za razašiljanje podatkovnih poruka


```

/* VANETMessageListenerThread */
private class VANETMessageListenerThread extends Thread {

    // ...

    public void run() {

        byte[] buff = new byte[VANETServiceBase.UDP_MAX_PACKET_SIZE];

        // ...

        while (running == true) {

            // Primanje UDP paketa
            DatagramPacket packet = new DatagramPacket(buff,
                buff.length);
            socket.receive(packet); // blocking

            // Priprema Parcelable objekta za deserijalizaciju
            Parcel parcel = Parcel.obtain();
            parcel.unmarshall(packet.getData(), packet.getOffset(),
                packet.getLength());
            parcel.setDataPosition(0);

            // Desrijalizacija primljene sekvence bajtova u VANETMessage
            // strukturu podataka
            final VANETMessage msg =
                VANETMessage.CREATOR.createFromParcel(parcel);
            msg.setStringAddressSource(packet.getAddress().
                getHostAddress());
            msg.setStringAddressDestination(hostAddress);
            msg.setIncoming(true);

            parcel.recycle();
            parcel = null;

            // Daljnja obrada primljene poruke provodi se u
            // aplikacijskom dijelu sučelja.

            // ...
        }

        // ...
    }
}

```

Programski kod P4. Klasa za primanje podatkovnih poruka

```

/* VANETLocationListener */
private class VANETLocationListener implements LocationListener {

    private final String TAG = VANETLocationListener.class.getSimpleName();

    // Poziva se nakon što je pronađena nova lokacija od strane odabranog
    public void onLocationChanged(Location location) {

        // ...

        currentLocation = location;

        double lat = location.getLatitude();
        double lng = location.getLongitude();

        // Izračun novih udaljenosti do susjeda u odnosu na novu primljenu
        lokaciju
        if(neighborNodesMapCopy != null) {
            float dist[] = new float[1];
            for(String nodeAddress : neighborNodesMapCopy.keySet()) {
                VANETNode node = neighborNodesMapCopy.get(nodeAddress);
                Location.distanceBetween(lat, lng, node.getLatitude(),
                node.getLongitude(), dist);
                node.setDistance(dist[0]);
            }
            // ...
        }

        VANETServiceBase.this.onLocationChanged(currentLocation);
    }

    public void onProviderEnabled(String provider) {
        // ...
    }

    public void onProviderDisabled(String provider) {
        // ...
    }

    public void onStatusChanged(String provider, int status, Bundle extras) {
        // ...
    }
}

```

Programski kod P5. Klasa za dohvaćanje GPS lokacije uređaja