

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Luka Košenina

**Uravnavanje cestnega prometa ob
izvedbi prevzema prometnega signala**

MAGISTRSKO DELO
MAGISTRSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: doc. dr. Dejan Lavbič

Ljubljana, 2018

AVTORSKE PRAVICE. Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljjanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

©2018 LUKA KOŠENINA

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Dejanu Lavbiču za pomoč, vodenje in nasvete pri nastanku dela. Rad bi se zahvalil tudi svoji družini in puncu Barbari, ki so me spodbujali in stali ob strani v času študija.

Luka Košenina, 2018

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Prezem prometnega signala	5
2.1	Pregled literature	7
2.2	Strategije prevzema prometnega signala	9
3	Izbira pristopa in tehnike	13
3.1	Simulacijska platforma SUMO	14
3.2	Vmesnik za nadzor prometa	19
3.3	Urejevalnik podatkov cestnega omrežja	19
4	Simulator tehnik prevzema s strani IV	21
4.1	Pridobitev in obdelava podatkov cestnega omrežja	21
4.2	Aplikacijska logika	23
4.3	Sistem za upravljanja simulacije	24
4.4	Sistem za upravljanje z intervencijskimi vozili	32
4.5	Kontrolni center cestnega prometa	40
5	Evalvacija tehnik prevzema v cestnem omrežju Ljubljane	45
5.1	Metodologija testiranja in analiziranja rezultatov	46
5.2	Testno okolje	46

KAZALO

5.3	Primerjava vrednosti območja prevzema (faza 1)	47
5.4	Testiranje uspešnosti tehnik v večjem obsegu (faza 2)	58
5.5	Sklepne ugotovitve testiranja	67
6	Zaključek	73

Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
GPS	global positioning system	sistem globalnega pozicioniranja
VRC	vehicle to roadside communication	komunikacija med vozilom in cesto
RFID	radio-frequency identification	radiofrekvenčna identifikacija
ITS	intelligent transportation system	inteligenten prometni sistem
V2I	vehicle to infrastructure	vozilo-infrastruktura
V2V	vehicle to vehicle	vozilo-vozilo
SUMO	simulation of urban mobility	simulacija mobilnosti v mestih
TraCI	traffic control interface	vmesnik za nadzor prometa
JOSM	java open street map editor	java urejevalnik odprtokodnega zemljevida
OSM	open street map	odprtokodni zemljevid
API	application programming interface	vmesnik uporabniškega programa
XML	extensible markup language	razširljivi označevalni jezik
PCK	entire intersection preemption control strategy	prevzem celotnega križišča
PPK	intersection path preemption control strategy	prevzem poti v križišču
PZV	green wave preemption control strategy	prevzem z zelenim valom
PZP	green wave on the whole path preemption control strategy	prevzem z zelenim valom na celotni poti

Povzetek

Naslov: Uravnavanje cestnega prometa ob izvedbi prevzema prometnega signala

Dandanes se vse bolj pogosto srečujemo s prometnimi zastoji na slovenskih cestah, še posebej na mestnih vpadnicah. Takšni prometni pogoji otežujejo izvedbo hitre in učinkovite intervencijske storitve. Če želimo olajšati delo intervencijskim vozilom na nujnih vožnjah, moramo vpeljati sistem, ki jim omogoča zmanjšanje časa potovanja, saj je to ključnega pomena pri reševanju človeških življenj in premoženja. Z namenom reševanja tega problema je bilo izdelanih mnogo rešitev, med katerimi so najuspešnejše tehnike prevzema prometnega signala z uporabo napredne signalizacije na področju inteligentnih prometnih sistemov. V magistrskem delu predstavimo izdelan simulator cestnega prometa za namen analize uspešnosti tehnik prevzema prometnega signala s strani intervencijskih vozil. Z uporabo simulatorja lahko na podlagi obsežnih rezultatov za poljubno cestno omrežje priporočimo, katera izmed testiranih tehnik prevzema je najbolj primerna za vpeljavo. Na primeru cestnoprometne infrastrukture Ljubljane smo s pomočjo simulatorja ugotovili, da vpeljavo tehnike prevzema z zelenim valom v povprečju doprinese 36% zmanjšanje časa vožnje intervencijskih vozil v primerjavi s povprečnim časom intervencijskega vozila, ki uporablja trenutno tehnologijo, tj. zvočna in svetlobna signalizacija.

Ključne besede

prometna znanost, prevzem prometnega signala za intervencijska vozila, upravljanje cestnega prometa, intervencijska vozila

Abstract

Title: Road traffic control with adoption of traffic signal preemption

Nowadays, we are increasingly confronted with traffic congestion on Slovenian roads, especially in urban areas. Such traffic conditions make it difficult to carry out a fast and effective emergency service. In order to reduce travel time of emergency vehicles, we need to establish a system to facilitate their work, as this has a potential in significant savings of life and property. In order to solve this problem, many solutions were developed. Among which the most successful techniques for preempting a traffic signal, in the field of intelligent transport systems, are using advanced signaling. In this master's thesis, we present a developed road traffic simulator for analyzing the success of the traffic signal preemption techniques. Through extensive simulation results, we can recommend which of the tested traffic signal preemption techniques is most suitable for deployment. In the example of Ljubljana's road infrastructure, with the help of the simulator, it was found that the introduction of a green wave preemption technique contributes an average of 36 % reduction in the travel time of the emergency vehicles compared to the average time of the emergency vehicle utilizing the current technology, sound and light signaling.

Keywords

traffic engineering, emergency vehicle preemption, road traffic management, emergency vehicles

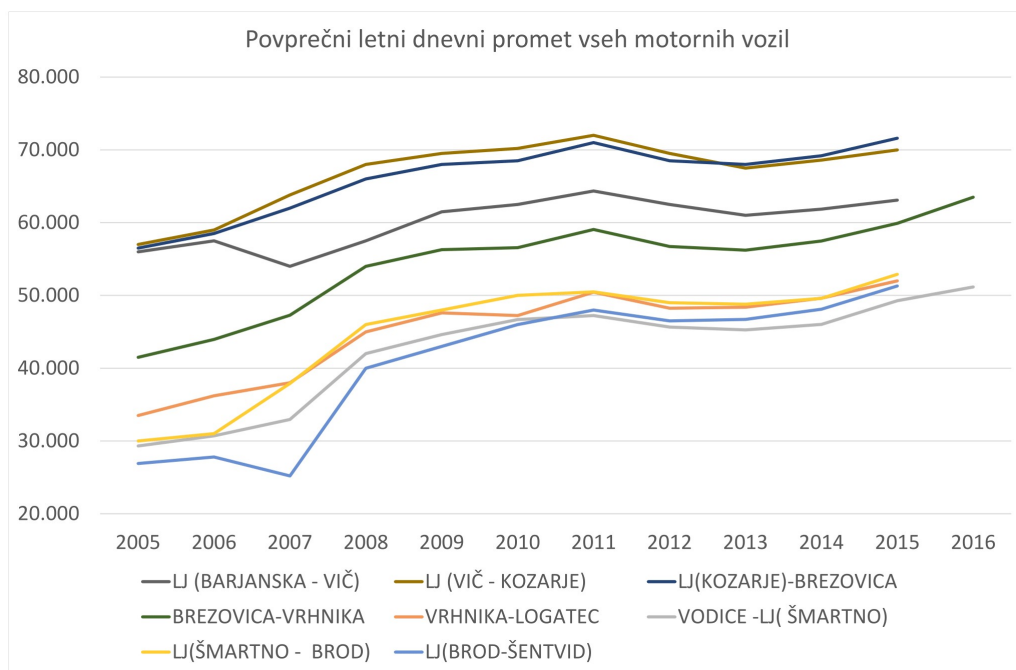
Poglavje 1

Uvod

V cestnem prometu sodelujejo različni tipi vozil. Mednje spadajo tudi intervencijska vozila (IV), kot so gasilsko, reševalno in policijsko vozilo. Tovrstna vozila med drugim izvajajo tudi intervencijske vožnje, katerih namen je nuditi nujno posredovanje oziroma nujen reševalni prevoz. Izvedba takšne vožnje je zahtevna in njena uspešnost lahko odloča tudi o življenju ali smrti potnikov oziroma ljudi na kraju nesreče. V takšnih situacijah je v času nujne vožnje vsaka pridobljena sekunda še kako dobrodošla, kar potrjujejo tudi ugotovitve v članku [1], kjer navajajo, da je možnost preživetja pacienta z zastojem srca vsako minuto manjša za 7 do 10 odstotkov. Velikost majhnega ognja se podvoji vsakih 17 sekund in lahko doseže požarni preskok v 7 minutah, zato so požarne in reševalne operacije določile čas operativnega standardnega odziva na manj kot 7 minut. Tehnike prevzema prometnega signala pomagajo doseči ta cilj.

Intervencijska vozila na nujni vožnji uporabljajo svetlobne in zvočne signale, s katerimi obveščajo sodelujočence v prometu na svojo prisotnost in zahtevajo razbremenitev poti pred seboj. Cestnoprometna pravila jim dovoljujejo tudi vožnjo skozi semaforizirana križišča pri rdeči luči. Namen tovrstne tehnologije in pravil je pomagati intervencijskim vozilom čim hitreje in varno prispeti na cilj. Takšna rešitev je uspešna predvsem ob manjših prometnih obremenitvah. Pri večjih prometnih obremenitvah se rešitev izkaže znatno slabše. V takšnih situacijah mora intervencijsko vozilo upočasniti vožnjo ter se včasih stežka in počasi prebija skozi zgoščen promet. Posledično lahko to privede do zmede pri ostalih voznikih, ki lahko v paniki še otežijo delo intervencijskega vozila.

Dandanes je na slovenskih cestah čedalje več prometa. Za lažjo predstavo trenda povečanja števila dnevnega pretoka vozil na naših cestah si lahko ogledamo sliko 1.1, na kateri lahko opazimo, da se je na posameznih cestnih odsekih v Ljubljani pretok prometa v zadnjih enajstih letih skoraj podvojil. V takšnem prometnem okolju je nastanek prometnih nesreč bolj pogost, hkrati porast števila dnevnega pretoka vozil povzroča daljšanje potovalnega časa. Posledično intervencijska vozila na dnevni ravni opravljajo svoje delo v čedalje težjih pogojih. Na tem mestu si lahko zamislimo, da trenutna tehnologija, ki jo v Sloveniji uporabljajo intervencijska vozila, to sta zvočna in svetlobna signalizacija, ni več kos pogojem v katerih obratujejo.



Slika 1.1: Prikaz povečanja povprečnega letnega dnevnega prometa vseh motornih vozil na območju Ljubljane v zadnjih 11 letih; po podatkih direkcije RS za infrastrukturo [2].

Ob pregledu posameznih uspešnih rešitev tega problema lahko opazimo, da se osnovna zamisel ni spreminjala že od samega začetka v osemdesetih letih prejšnjega stoletja in je ostala enaka do dandanes [3–7]. Vsem tem rešitvam pravimo tehnike prevzema prometnega signala. Bistvo vseh posameznih tehnik prevzema prome-

tnega signala je, da si intervencijsko vozilo na nujni vožnji ne pomaga le z zvočnimi in svetlobnimi signali, ampak tudi s sistemom prevzema prometnega signala, ki pripravlja zeleno luč v njegovi smeri ob vožnji skozi semaforizirano križišče. Na ta način tehnike prevzema prometnega signala omogočajo intervencijskim vozilom varnejšo in hitrejšo vožnjo skozi semaforizirana križišča.

Prevzem prometnega signala deluje na principu prepoznavanja intervencijskega vozila na nujni vožnji s pomočjo detektorja, ki nato preko krmilnika v križišču nastavi zeleni signal semaforja v smeri vozila, dokler križišča ne zapusti. Večina sistemov prevzema prometnega signala za posamezno intervencijsko vozilo v danem trenutku opravlja le signal naslednjega najbližjega semaforja [5–7]. To pomeni, da sistem na poti posameznega vozila obravnava semafor za semaforjem. Posledično mora intervencijsko vozilo v primeru velike prometne obremenitve upočasniti vožnjo ob prihodu v križišče, da se sprostí promet pred njim. V takšnih situacijah so ostali vozniki lahko zmedeni, saj ne vedo kako odreagirati, ali se morajo odmakniti intervencijskemu vozilu ali morajo nadaljevati vožnjo skozi križišče zaradi zelenega signala na semaforju.

Pri iskanju načina izboljšanja izvedbe intervencijskih storitev moramo upoštevati tudi vpliv in posledice, ki jih tovrstne tehnike prinesejo v cestni promet. Zavedati se moramo, da tehnike prevzema prometnega signala za intervencijska vozila v primeru največje obremenitve prometa lahko povzročijo daljšanje kolone vozil v semaforiziranih križiščih, a hkrati v takšnih pogojih največ pripomorejo k hitremu prihodu intervencijskega vozila na cilj. Intervencijske storitve z uporabo tehnik prevzema prometnega signala ne doprinašajo le krajšega časa vožnje do lokacije incidenta ampak tudi večjo varnost vozil v prometu.

V našem delu smo izdelali simulator cestnega prometa za namen analize in ocenitve prispevka tehnik prevzema prometnega signala za intervencijska vozila. Kasneje smo z uporabo simulatorja in podatkov cestnega omrežja Ljubljane izvedli obširno testiranje štirih različnih tehnik prevzema prometnega signala. Na podlagi rezultatov smo pripravili celostno analizo in ovrednotenje uspešnosti posameznih tehnik v primerjavi s tehnologijo, ki jo trenutno uporabljajo intervencijska vozila znotraj cestnega omrežja Ljubljane. Na ta način smo ugotovili, katero tehniko prevzema prometnega signala in v kolikšnem obsegu cestnega omrežja je najbolj smiselno implementirati v infrastrukturo Ljubljanskega cestnega prometa.

Magistrsko delo je sestavljeno iz šestih poglavij. Najprej je predstavljeno obravnavano področje magistrskega dela, ki vsebuje tudi motivacijo in cilj dela. V naslednjem poglavju so med drugim predstavljene tudi vse aktualne tehnike izvajanja prevzema prometnega signala. Sledi poglavje, v katerem je predstavljena izbira pristopa in tehnike, s katero smo izdelali praktični del magistrskega dela. Implementacija dela je opisana v četrtem poglavju, kjer so navedene tudi vse implementirane različice prevzema in ponastavitve prometnega signala. Znotraj istega poglavja je opisan tudi postopek izvedbe simulacije, s pomočjo katere lahko preizkusimo delovanje in uspešnost posamezne tehnike. V petem poglavju je opisan postopek testiranja predlagane rešitve ter ovrednotenje posameznih rezultatov. Zadnje poglavje pa predstavlja možne izboljšave in polaga smernice za nadaljnje delo.

Poglavje 2

Prevzem prometnega signala

Čeprav je postopek prevzema prometnega signala z uporabo napredne signalizacije rezultat nedavnega razvoja na področju inteligentnih prometnih sistemov (ITS), to ne velja za sam koncept določanja prednosti intervencijskim vozilom.

Že leta 1929 je American Engineering Council v reviji Street Traffic Signs, Signals and Markings pripravil smernice za kasneje uveljavljene sisteme prioritiziranja intervencijskih vozil [8]. S pojavitvijo strojne opreme za zaznavanje vozil z uporabo avtomobilskih oddajnikov in signalnih sprejemnikov v šestdesetih letih se je pričelo novo poglavje v razvoju tehnik prevzema prometnega signala.

Napredek na področju inteligentnih prometnih sistemov je povzročil razvoj nove tehnologije za namene prevzema prometnega signala. Tovrstno tehnologijo predstavljajo sistemi za samodejno zaznavanje lokacije vozil z uporabo sistema globalnega pozicioniranja (GPS) in sistemi za komuniciranje med vozili in cesto (VRC) z uporabo šifriranih infrardečih in radijskih valov.

Kljub napredku iz tehnološkega vidika se sama logika prevzema prometnega signala ni korenito spremenila. Aktualne rešitve še vedno delujejo po principu sistema zaznavanja, prevzema in prehoda, ki vključujejo zaznavanje prihoda intervencijskega vozila v semaforizirano križišče, s čimer se sproži prevzem prometnega signala in krmilnik preklopi stanje signala semaforja na vnaprej določeno vrednost. Ob izhodu intervencijskega vozila iz križišča se signal semaforja ponastavi na prej uporabljeno vrednost.

Velika večina trenutno uporabljenih tehnologij prevzema prometnega signala lahko deluje na treh različnih osnovah [3,9,10]. In sicer na osnovi sistema svetlobnih

ali infrardečih signalov, sistema na zvočni osnovi in sistema na osnovi radijskih valov. Vsak izmed prej navedenih sistemov ima tako prednosti kot slabosti, te pa so prikazane v tabeli 2.1.

Primerjava	Potrebna namestitvev namen-skega oddajnika	Dovzeten na motnje v zvezi z elek-tričnim tokom	Dovzeten na ovire vidnega ali zvočnega polja	Delovanje sistema je dovzetno glede na vremenske razmere
Tehnologija na osnovi				
Svetlobnih ali infrardečih signalov	Da	Ne	Da	Da
Zvočnih signalov	Ne	Ne	Da	Ne
Radijskih signalov	Da	Da	Ne	Ne

Tabela 2.1: Primerjava prednosti in slabosti različnih tehnologij prevzema prometnega signala [11].

Cilj tehnik prevzema prometnega signala v semaforiziranih križiščih je zmanjšanje časa vožnje intervencijskih vozil. Kot je že bilo navedeno, trenutne tehnike prevzema ne delujejo najbolje vzdolž preobremenjenih cestnih odsekov, kjer se lahko pojavi prelivanje vozil v križiščih oziroma v najslabšem primeru tudi prometni zamašek. Tudi če intervencijsko vozilo v takšnih okoliščinah uspe prevzeti signal prvega semaforja križišča, kolona vozil naslednjega križišča zavira gibanje intervencijskega vozila, saj to ne more prevzeti signal naslednjega križišča, dokler ni znotraj njegovega območja zaznavanja vozil na nujni vožnji. V takšnem primeru je treba uporabiti predhodno razbremenjevanje pretoka vozil ter na ta način intervencijskim vozilom omogočiti hitro in varno vožnjo skozi koridor z minimalnim zamikom oziroma ustavljanjem. Brez uporabe tovrstne tehnike, tradicionalni prevzem prometnega signala semaforja za semaforjem odraža daljši čas vožnje intervencijskega vozila, kot tudi preostalih vozil v prometu.

2.1 Pregled literature

S pojavitvijo oddajnikov in detektorjev signala v šestdesetih letih prejšnjega stoletja so nastali prvi zametki tehnik prevzema prometnega signala. Tradicionalni cestnoprometni sistemi za namen prevzema signala semaforja uporabljajo oddajnike zvoka, svetlobe ali radio-frekvenčnih signalov, nameščene na vozilu, in ustrezne sprejemnike, nameščene na semaforju oziroma v njihovi bližini.

Sistemi na osnovi zvočnega polja uporabljajo oddajnik določenih frekvenc zvoka (v nadaljevanju sirena), nameščen na intervencijskem vozilu. Sireno prepozna usmerjeni mikrofoni, ki je navadno nameščen na semaforju oziroma nekje v njegovi bližini. Ta mora biti ustrezno nastavljen, da prepozna oziroma pravilno obravnava samo zvok sirene intervencijskega vozila [9]. V posameznem križišču mora biti nameščenih toliko mikrofonov, kot je vhodnih cest. Ob prepoznanju sirene kontrolna enota križišča ustrezno nastavi vnaprej določeni signal semaforjev v križišču. Tovrstni sistem zahteva uporabo sirene intervencijskega vozila pri vožnji skozi vsako semaforizirano križišče in posledično vozilo zaradi glasne sirene, približno 115 dB [12], vnaša motnje in nemir v okolico. Slabost tehnologije na osnovi zvočnega polja je tudi neustrezno delovanje ob pojavu ovir znotraj zvočnega polja, posledično mikrofoni ne zazna sirene in intervencijsko vozilo ne more prevzeti signala. Sistem prav tako ni odporen na zaznavanje neavtoriziranih vozil, ki pravilno posnemajo zvok sirene intervencijskega vozila.

Sistemi na osnovi vidnega polja temeljijo na uporabi oddajnika infrardečih signalov ali utripajočih vidnih snopov svetlobe na določeni frekvenci, ki je združljiva s sprejemnikom na semaforju [3]. Semafor na ta način zazna prihajajoče intervencijsko vozilo in pošlje zahtevek za prevzem prometnega signala kontrolni enoti križišča, ki ustrezno obravnava zahtevek. Ko intervencijsko vozilo zapusti križišče, se signal semaforja ustrezno ponastavi. Uporaba tovrstnega oddajnika in sprejemnika ni dovolj za ovire znotraj vidnega polja ali na slabe vremenske razmere. Sistem je prav tako ranljiv na posnemanje svetlobnih signalov neavtoriziranih vozil, ki želijo izigrati tehnologijo prevzema signala.

Zadnji izmed tradicionalnih sistemov deluje na osnovi radijskih signalov, ki uporabljajo signal kratkega dosega. Na ta način odpravljajo pomanjkljivosti sistemov, ki temeljijo na vidnem polju. Radijski valovi so odporni na vizualne ovire in na vse vrste vremenskih razmer, saj jih ni mogoče popolnoma blokirati. Njihovo

delovanje temelji na uporabi usmerjenih anten, nameščenih tako na intervencijskem vozilu kot tudi na sprejemnikih v križišču. Ob zaznanem radio-frekvenčnem pulzu krmilnik križišča izvede prevzem prometnega signala. Navadno tovrstni sistemi uporabljajo RFID tehnologijo, ki se najbolje izkaže v primeru večpasovnih križišč, saj lahko namestimo RFID bralnike na vsak posamezni vozni pas [10]. V tem primeru lahko krmilnik križišča ustrezno obravnava zahtevek glede na vozni pas, po katerem prihaja intervencijsko vozilo. Kot vsak sistem ima tudi ta pomanjkljivosti, in sicer, njegovo delovanje ni pravilno ob prisotnosti motenj električnega toka, posledično se lahko zgodi, da intervencijsko vozilo ni zaznano s strani sprejemnika radijskega signala. Verjetnost pojavitve takšnega dogodka lahko zmanjšamo s postavitvijo večjega števila sprejemnikov na posamezni vozni pas.

V zadnjih treh desetletjih smo bili priča začetku, razvoju, uvajanju in ogromni rasti inteligentnih transportnih sistemov (ITS) ter njihovem pomembnemu vplivu na naša življenja in družbo. Danes prometno raziskovanje in razvoj nista več področji, na katerih prevladujejo civilne, mehanske, operativne raziskave in druge tradicionalne inženirske discipline. Računalniške vede, komunikacija, medomrežje, metode umetne inteligence in številna druga nastajajoča informacijska ter tehnična področja postajajo jedro nove tehnologije ITS in predstavljajo ključni del sodobnega transportnega inženirstva. V tem obdobju je nastalo veliko uporabnih rešitev, med drugimi namenski program modeliranja prometa z uporabo celičnih avtomatov, širok nabor tehnik rudarjenja podatkov za namen analize vedenja prometa, metode umetne inteligence za namen ocenjevanja prometnih razmer v realnem času itd.

Danes tehnike prevzema prometnega signala prav tako vključujejo del novitet, ki jih je doprinesel razvoj ITS. Spremembe je moč opaziti tako na tehnološkem kot tudi na konceptualnem področju. V smislu tehnologije novejša rešitve prevzema prometnega signala uporabljajo brezžično komunikacijo in navigacijske sisteme. Tovrstne tehnologije omogočajo izmenjavo informacij med vozili samimi, kot tudi med vozili in namenskim cestnoprometnimi napravami preko komunikacije vozilo-infrastruktura (V2I) oziroma vozilo-vozilo (V2V). Ideja je, da si vozila z infrastrukturo izmenjujejo informacije o njegovi hitrosti in lokaciji. Na ta način se odpirajo različne možnosti implementacije tehnike prevzema prometnega signala z uporabo GPS signala in brezžičnih komunikacij.

Intervencijska vozila, opremljena s komunikacijskim sistemom V2V in V2I, sporočajo svojo lokacijo, pot in cilj vsem vozilom in infrastrukturi na svoji poti. Vozila, ki so v neposredni bližini intervencijskega vozila oziroma potujejo po njegovi poti, sprejmejo sporočilo o njegovem prihodu in lahko v čim krajšem času varno ustvarijo prost prehod intervencijskemu vozilu. Poleg tega je obveščena tudi vsa infrastruktura, ki je na poti, da pripravi zeleni signal na semaforju ob njegovem prihodu v smeri intervencijske poti. Infrastruktura poskrbi tudi za obveščanje soudeležencev v prometu z informacijami o poti intervencijskega vozila, da lahko izberejo drugo, bolj optimalno pot.

2.2 Strategije prevzema prometnega signala

V zgornjem razdelku smo predstavili strojno opremo, s pomočjo katere lahko prepoznamo in ustrezno obravnavamo intervencijsko vozilo ob vstopu v semaforizirano križišče oziroma kar na celotni poti intervencijske vožnje. Kontrolna enota semaforiziranega križišča oziroma kontrolni center cestnega prometa lahko obravnava zahtevek za prevzem prometnega signala na različne načine. V nadaljevanju sledi opis različnih strategij prevzema prometnega signala za namen izvedbe nujne vožnje intervencijskega vozila.

2.2.1 Segmentna strategija sistema za prevzem prometnega signala

Pot intervencijskega vozila na nujni vožnji lahko razdelimo na manjše segmente, kjer posamezni segment poti vključuje eno semaforizirano križišče. Tekom vožnje intervencijskega vozila zaporedoma izvajamo prevzem prometnega signala na posameznem segmentu poti [13]. Ob vstopu intervencijskega vozila v določeni segment poti se nemudoma izvede prevzem prometnega signala za ustrezno semaforizirano križišče. Ta dogodek sproži spremembo stanja normalnih vozil znotraj segmenta v stanje v sili. To pomeni, da vozila poskušajo z manevrom hitre menjave voznega pasu pripraviti prosto pot prihajajočemu intervencijskemu vozilu. Izvedba takšne strategije prevzema prometnega signala je najbolj primerna v manj prometno obremenjenih cestnih odsekih oziroma v večpasovnih semaforiziranih križiščih.

Tehnika se izkaže kot slabša v gostejšem prometu, saj je odzivnost vozil počasnejša zaradi pomanjkanja prostora za umik s poti intervencijskega vozila. Hkrati tehnika ni robustna v situacijah, ko so razdalje med posameznimi segmenti oziroma križišči kratke. Takšna postavitve semaforjev v primeru povečanega prometnega povpraševanja ni dovoljna na pojavitve preliva kolon vozil drugega križišča na vhodne pasove prvega [14]. V takšnem primeru intervencijsko vozilo prevzame prometni signal prvega križišča v koridorju in se mora za prevzem naslednjega najprej prebiti skozi zgoščen promet prvega.

2.2.2 Strategija prevzema prometnega signala z zelenim valom

Slabosti strategije, opisane v prejšnjem razdelku, odpravlja strategija prevzema prometnega signala z zelenim valom, pri kateri najprej izberemo optimalno pot za namen izvedbe nujne vožnje [15]. Bistvena razlika tovrstne strategije v primerjavi s prej opisano je v številu hkrati obravnavanih semaforiziranih križišč na poti intervencijskega vozila. Segmentna strategija obravnava semafor za semaforjem, medtem ko strategija z zelenim valom obravnava križišča znotraj določene razdalje od intervencijskega vozila v smeri načrtane poti [16]. Dodana vrednost takšne strategije, v smislu prihranka na času vožnje, je najbolj izrazita v bolj obremenjenih odsekih cestnega omrežja.

2.2.3 Strategija s prisvojitvijo poti

Pred odhodom intervencijskega vozila na nujno vožnjo je potrebno izračunati optimalno pot, na podlagi katere pričnemo izvajati umik vozil s poti [17]. Strategija prisvojitve poti za namen nujne vožnje s pomočjo infrastrukture cestnega prometa poskrbi za preusmerjanje oziroma razbremenjevanje prometa pred prihodom intervencijskega vozila [18]. Komunikaciji infrastruktura-vozilo in vozilo-vozilo omogočata hitro širjenje informacije ustreznim vozilom, naj ustvarijo prosto pot prihajajočemu intervencijskemu vozilu [19]. Pri tem lahko kontrolni center v semaforiziranih križiščih, ki jih intervencijsko vozilo še ni prevozilo, preusmerja promet tako, da razbremeni pot intervencijskega vozila. Izvedba tovrstne strategije zahteva uporabo napredne tehnologije, tako na področju prometne infrastrukture

kot tudi vozil znotraj cestnega prometa. Sprejetje tako napredne tehnologije je na področju vozil zelo počasno, hkrati pa je strategija s prisvojitvijo poti najbolj učinkovita ravno v okolju, kjer so vsa vozila sposobna komunicirati bodisi s preostalimi vozili bodisi z infrastrukturo v cestnem omrežju.

Poglavje 3

Izbira pristopa in tehnike

V prejšnjem poglavju smo predstavili različne pristope prevzema prometnega signala. Iz opisov je moč razbrati, da je posamezna rešitev sestavljena iz strojne in programske opreme. Cilj našega dela je načrtovati in izdelati simulacijo ter analizo tehnik prevzema prometnega signala nad abstraktnim nivojem strojne opreme. Tovrstni pristop omogoča izdelavo optimalne programske opreme pri reševanju danega problema in nas ne omejuje na uporabo določene strojne opreme. Na ta način lahko ugotovimo, katera tehnika doprinese največjo dodano vrednost pri izvajanju intervencijskih storitev v določenem cestnem omrežju. Na podlagi pridobljenih podatkov analize se kasneje lažje odločimo, katero rešitev je smiselno namestiti in uporabiti tudi v realnosti.

Programsko rešitev je potrebno tekom razvoja ter ob končani implementaciji preizkušati in ocenjevati njeno delovanje. Simulator cestnega prometa predstavlja najenostavnejšo rešitev, saj ponuja hitro testiranje in ocenjevanje uspešnosti predlagane rešitve. Trenutno so na tem področju aktualni naslednji simulatorji: SUMO¹, MATSim² in MovSim³. Izmed naštetih kandidatov smo se v našem delu odločili za uporabo programskega paketa SUMO. Odločitev je bila sklenjena na podlagi kakovosti in konstantnega razvoja programske opreme, možnostmi prilagajanja simulacije, širokega nabora podprtih formatov cestnega omrežja in obsežne dokumentacije. SUMO poleg simuliranja prometnega povpraševanja ponuja tudi

¹Dostopno na: <http://sumo.dlr.de>

²Dostopno na: <http://www.matsim.org>

³Dostopno na: <https://github.com/movsim/movsim>

različna orodja za pripravo in upravljanje simulacij, s pomočjo katerih smo v našem delu ustrezno pripravili podatke o cestni infrastrukturi.

Pomembna lastnost programskega paketa SUMO so tudi razširitve, ki razvijalcem ponujajo dodatne zmožnosti simuliranja in hitrejši razvoj aplikacij. Pri razvoju predlagane rešitve smo uporabili razširitev TraCI⁴ za pridobivanje vrednosti objektov znotraj simulacije in instantno manipulacijo njihovega vedenja.

V nadaljevanju sledi podrobnejši opis programskega paketa SUMO in njegove razširitve TraCI. V zadnjem razdelku pa se nahaja opis programa JOSM⁵ za urejanje podatkov cestnega omrežja v formatu OSM.

3.1 Simulacijska platforma SUMO

SUMO je mikroskopska, prostorsko neprekinjena in časovno diskretna simulacijska platforma [20]. Odprtokodna različica je bila prvič na voljo leta 2002. Skozi vsa ta leta je bil Inštitut za prometne sisteme v Nemškem vesoljskem centru glavni podpornik razvoja programskega paketa, medtem ko zunanje stranke podpirajo razvoj razširitev. Tekom razvoja se je SUMO razvil v celostno zbirko storitev za modeliranje prometa, ki podpira različne izvirne formate cestnega omrežja ter generiranje in usmerjanje prometnega povpraševanja.

SUMO obravnava cestna omrežja v obliki grafov, kjer vozlišča predstavljajo križišča, povezave pa ceste. Vsako križišče je opisano s podatki o položaju, obliki in s tako imenovanimi desnimi pravili, ki jih lahko nadomeščajo semaforji. Povezave med vozlišči so neusmerjene in vsebujejo določeno število voznih pasov. Posamezni vozni pas hrani svoje geometrijske lastnosti, vrednost najvišje dovoljene hitrosti vožnje in informacije o tipu vozil, ki jim je dovoljena vožnja.

Poleg osnovnega pogleda na cestno omrežje SUMO vključuje načrte semaforjev in povezave med voznimi pasovi v križiščih, ki opisujejo, katere pasove je mogoče uporabiti za doseganje naslednjega pasu. Načrt semaforja sestoji iz vsaj enega programa, kjer posamezni program sestoji iz vsaj ene faze semaforja. Faza semaforja je sestavljena iz podatka o njeni dolžini trajanja in seznamu signalnih stanj. Posamezno stanje v seznamu signalnih stanj naslavlja stanje luči semaforja za določeno

⁴Dostopno na: <http://sumo.dlr.de/wiki/TraCI>

⁵Dostopno na: <https://josm.openstreetmap.de>

povezavo med vhodnim in izhodnim voznim pasom križišča. Vsa možna stanja luči semaforja so navedena v tabeli 3.1.

Znak	Opis
r	Rdeča luč – prepovedana vožnja.
y	Rumena luč – prepovedana vožnja, razen v primeru, ko se vozilo, pri vožnji z dovoljeno hitrostjo, ne more varno ustaviti.
g	Zelena luč brez prioritete – vozilo lahko prevozi križišče, če s tem ne ovira poti vozila s prednostjo.
G	Zelena luč s prioriteto – vozila lahko prevozijo križišče.
u	Rdeča in rumena luč hkrati – prepovedana vožnja in napoved, da se bo prižgala zelena luč.
o	Izključen signal – uporaba utripajoče luči in prometnih znakov.
0	Izključen signal brez utripajoče luči – uporaba desnega pravila.

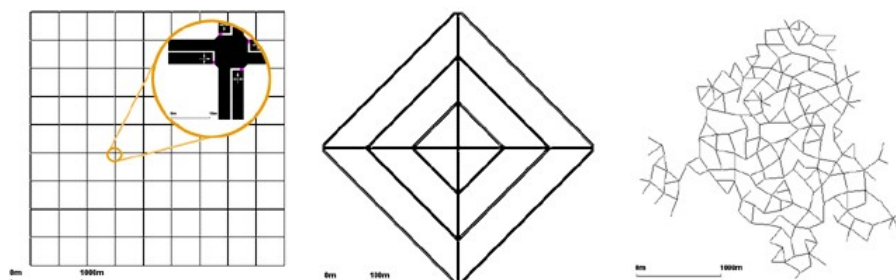
Tabela 3.1: Vsa možna stanja luči semaforiziranega križišča.

V grobem, programski paket sestoji iz treh pomembnih gradnikov, ki so natančneje opisani v nadaljevanju.

3.1.1 Priprava cestnega omrežja

SUMO cestno omrežje lahko pripravimo na dva načina. To lahko dosežemo bodisi z uporabo aplikacije `netgenerate`, ki naključno generira cestno omrežje, bodisi z uporabo aplikacije `netconvert`, ki pretvori obstoječa cestna omrežja v SUMO podprti format.

Pri prvem načinu generator cestnih omrežij omogoča gradnjo treh različnih vrst abstraktnih cestnih omrežij, in sicer: `manhattan` podobno omrežje, krožna `spider-net` omrežja in naključna omrežja. Željeni način priprave cestnega omrežja podamo preko vhodnega parametra skripte `netgenerate`. Poleg omenjenega parametra skripta ponuja bogat nabor vhodnih parametrov, s katerimi lahko prilagajamo način generiranja omrežja. Zgled vseh treh različnih vrst cestnih omrežij prikazuje slika 3.1.



Slika 3.1: Primer vseh treh različnih vrst abstraktnih cestnih omrežij, ki jih lahko generiramo z uporabo skripte `netgenerate`; iz leve proti desni: `manhattan`, `spider` in `naključno` omrežje.

Drugi način priprave cestnega omrežja je pretvorba že obstoječega cestnega omrežja v SUMO podprti format. Skripta omogoča pretvorbo cestnega omrežja bodisi iz znanega formata drugih cestnih simulatorjev, kot sta VISUM⁶ in MATSim⁷, bodisi drugih pogostih digitalnih formatov cestnega omrežja, kot sta na primer OpenStreetMap⁸ in OpenDRIVE⁹.

Digitalni formati cestnega prometa se navadno uporabljajo za navigacijske namene in ne vsebujejo dovolj natančnih podatkov, kot jih zahteva mikroskopska simulacija cestnega prometa. Najbolj pogosti so manjkajoči podatki o številu cestnih pasov, zlasti pred križišči, o povezavah med vhodnimi in izhodnimi pasovi križišč, o položaju in načrtu semaforjev itd. Z namenom, da bi se izognili prej naštetim pomanjkljivostim, tako aplikacija za generiranje kakor tudi aplikacija za pretvorbo cestnega omrežja uporabljata skupno programsko knjižnico za določitev manjkajočih vrednosti. Izračun manjkajočih vrednosti je še vedno časovno zahtevna operacija in v primeru kompleksnih križišč rezultat ni nujno optimalen. V takšnem primeru lahko uporabimo orodje `netedit`, ki omogoča grafično urejanje cestnega omrežja. Alternativen način popravljanja napak oziroma optimiziranja cestnega omrežja je ročno spreminjanje vhodnih podatkov XML, vendar je to v večini primerov bolj zahtevno in časovno potratno opravilo.

⁶Dostopno na: <http://vision-traffic.ptvgroup.com>

⁷Dostopno na: <http://www.matsim.org>

⁸Dostopno na: <https://www.openstreetmap.org>

⁹Dostopno na: <http://www.opendrive.org>

3.1.2 Vozila in poti

V SUMO programski opremi je vsako vozilo definirano vsaj z enoličnim identifikatorjem, časom odhoda in potjo vozila skozi omrežje. Pot vozila je definirana s seznamom povezav omrežja med začetnim in končnim vozliščem poti. Privzeti tip vozila je osebno vozilo, na voljo pa so še naslednji tipi: taksi, vojaško vozilo, avtobus, tovornjak, motor, vlak itd. Tip vozila določa fizikalne lastnosti vozila in njegove spremenljivke uporabljenega modela gibanja. Po želji lahko definiramo nov tip vozila, kjer lahko poljubno nastavimo dolžino, širino, barvo, najvišjo možno hitrost, pospešek, pojemek vozila itd. Tip vozila določa tudi razred onesnaževanja in hrupa. Po potrebi je vozilo lahko bolj podrobno opisano z določenimi lastnostmi odhoda in prihoda vozila. Nastavimo lahko, s kakšno hitrostjo in na katerem voznem pasu vozilo vstopi v simulacijo.

Pot vozila je lahko podana kot lastnost vozila v obliki seznama urejenih in povezanih povezav, ki jih bo vozilo prevozilo. Drugi in pogostejše uporabljeni način je z definiranjem podatkovnega tipa poti, kjer navedemo enolični identifikator in seznam povezanih povezav. Definiran tip poti podamo kot referenco posameznemu vozilu. S tem načinom lahko večkratno uporabimo posamezne definirane poti za različna vozila. Možno je določiti tudi tok vozil, ki ga opisujejo enaki atributi kot podatkovni tip vozila z razliko časa odhoda in nekaterih dodatnih lastnosti. Dodatne lastnosti določajo čas odhoda prvega vozila, konec intervala odhoda, poljubno lahko omejimo število odhodnih vozil na uro.

Simulacija cestnega prometa v omrežju velikosti poljubnega mesta zahteva veliko število definiranih vozil in njihovih poti. Z uporabo programa `randomTrips.py` lahko ustvarimo niz naključnih potovanj za podano omrežje. Program poskrbi za pripravo naključno generiranih poti vozil v določenem časovnem intervalu in kot rezultat vrne datoteko XML z ustreznimi podatki za izvedbo simulacije prometa.

3.1.3 Simulacija

Simulacijo izvedemo z uporabo programa `sumo`, ki mu moramo navesti podatke o cestnem omrežju, vozilih in poteh. Ob končani simulaciji SUMO omogoča izvoz različnih rezultatov, kot je na primer položaj posameznega vozila ob vsakem koraku simulacije. Bolj kompleksen primer rezultatov so informacije o potovanju

posameznega vozila ali pa združene meritve vseh cest oziroma voznih pasov. Poleg običajnih prometnih meritev SUMO ponuja razširjen model metrik porabe goriva in onesnaževalih emisij.

Program `sumo-gui` razširja program `sumo` z grafičnim vmesnikom (GUI) za izris simuliranega omrežja in vozil. Grafični vmesnik ponuja vrsto različnih načinov prikaza, kot so vizualizacije hitrosti, časa čakanja in sledenja posameznih vozil.

Programa izvajata časovno diskretno simulacijo s privzeto dolžino koraka ene sekunde. Čas dolžine koraka simulacije lahko poljubno nastavimo znotraj intervala od ene milisekunde do ene sekunde. Interno je čas prikazan v mikrosekundah in je shranjen kot celoštevilčna vrednost. Dolžina simulacije je navzgor omejena z vrednostjo 49 dni. Simulacijski model je prostorsko neprekinjen in položaj vsakega vozila je opisan s cestnim pasom, na katerem se nahaja vozilo, ter z oddaljenostjo od začetka tega pasu. Med vožnjo vozila skozi omrežje se njegova hitrost izračuna z uporabo tako imenovanega modela sledenja avtomobilu (ang.: *car-following model*). SUMO privzeto uporablja razširitev stohastičnega avtomobilskega modela, ki ga je razvil Stefan Krauß [21]. Njegov model je bil izbran zaradi njegove enostavnosti in učinkovitosti. Največji pomanjkljivosti modela sta konservativna velikost vrzeli ob menjavi voznega pasu, ki posledično prinaša premajhno prepustnost, in ne prilagajanje modela ob spremembi dolžine časovnega koraka. Težave modela so bile povod za implementacijo programskega vmesnika (API), ki omogoča izvajanje drugih modelov sledenja avtomobilom. Trenutno SUMO vključuje model z uporabo Todosievih akcijskih točk, inteligentni model voznika (ang.: *Intelligent Driver Model*, IDM), Wiedemannov model sledenja vozilu itd. Nekateri izmed naštetih modelov prinašajo druge probleme v zapletenih cestnih omrežjih in so namenjeni zgolj eksperimentalni uporabi. Ker gre za simulacijo prometnega toka, obstaja omejen nabor možnosti odražanja vedenja posameznega voznika. Vseeno je možno posameznemu vozilu dati svoj lasten nabor parametrov (od dolžine avtomobila do lastnosti modela, kot je prednostni čas vožnje) in celo hkrati uporabiti različne modele. Izračun menjave voznega pasu opravi interni model implementiran znotraj SUMO.

3.2 Vmesnik za nadzor prometa

TraCI (ang.: Traffic Control Interface) je razširitev SUMO programske opreme in omogoča interakcijo z zunanjo aplikacijo preko vtične povezave (ang.: socket connection). Ob zagonu SUMO programa je potrebno podati številko vrat, na katera je potrebno poslušati, če želimo omogočiti on-line interakcijo. Ko SUMO naloži podatke simulacije, prične poslušati na ta vrata za vhodno komunikacijo. Po uspešni povezavi odjemalec postane odgovoren za sprožitev simulacijskih korakov v SUMO, kot tudi za zaprtje povezave, s čimer sproži zaključek simulacije. Odjemalec lahko dostopa do vrednosti skoraj vseh artefaktov znotraj simulacije, kot so križišča, povezave, prometni pasovi, semaforji, induktivne zanke in seveda vozila. Odjemalec lahko tudi spreminja vrednosti, na primer nastavi nov program semaforja, spremeni hitrost vozila, prisili vozilo k menjavi voznega pasu. Vse to omogoča kompleksno interakcijo, kot sta na primer on-line sinhronizacija semaforjev ali modeliranje posebnega obnašanja posameznih vozil. SUMO vključuje knjižnico odjemalca, napisano v programskih jezikih `Python` in `Java`. Odjemalec je lahko napisan v poljubnem programskem jeziku, dokler podpira vtičnice TCP.

3.3 Urejevalnik podatkov cestnega omrežja

JOSM (ang.: Java OpenStreetMap Editor) je program, namenjen urejanju podatkov cestnega omrežja v formatu OSM. Ponuja širok nabor funkcij in uporabnih orodij za različne sloge urejanja cestnih omrežij. Podatke, ki jih želimo urediti, lahko preberemo iz trdega diska oziroma jih prenesemo s pomočjo JOSM programa iz OSM portala. Program ponuja izredno veliko nastavitev in vtičnikov, s pomočjo katerih lahko med drugim tudi preprostejše vnašamo nove podatke v zemljevid.

Poglavje 4

Simulator tehnik prevzema s strani IV

Cilj naše naloge je izdelava simulatorja cestnega prometa za ovrednotenje tehnik prevzema prometnega signala s strani intervencijskega vozila. Implementacija je potekala v več korakih od priprave podatkov prometnega omrežja do izvoza in strukturiranja rezultatov. Osrednji del rešitve predstavljajo različni načini prevzema prometnega signala, ki jih lahko smiselno ocenimo in primerjamo. Programsko opremo smo izdelali v programskem jeziku `Python`, saj je v tem jeziku na voljo tudi knjižnica odjemalca (`TraCI`) za komunikacijo s SUMO.

4.1 Pridobitev in obdelava podatkov cestnega omrežja

Podatki prometnega omrežja so sestavni del brez katerega izvedba simulacije cestnega prometa ni mogoča. V prejšnjem poglavju sta navedena dva možna pristopa priprave podatkov, generiranje in uvoz oziroma pretvorba obstoječih podatkov. Z namenom izvedbe simulacije na realnih podatkih cestnega omrežja smo se v našem delu odločili za uporabo že obstoječih podatkov.

Podatke cestnega omrežja smo prenesli preko `OpenStreetMap` spletne aplikacije. Njihovi podatki so zapisani v specifičnem formatu, ki ga SUMO ne podpira. Še preden smo pretvorili podatke v SUMO podprti format, je bilo potrebno od-

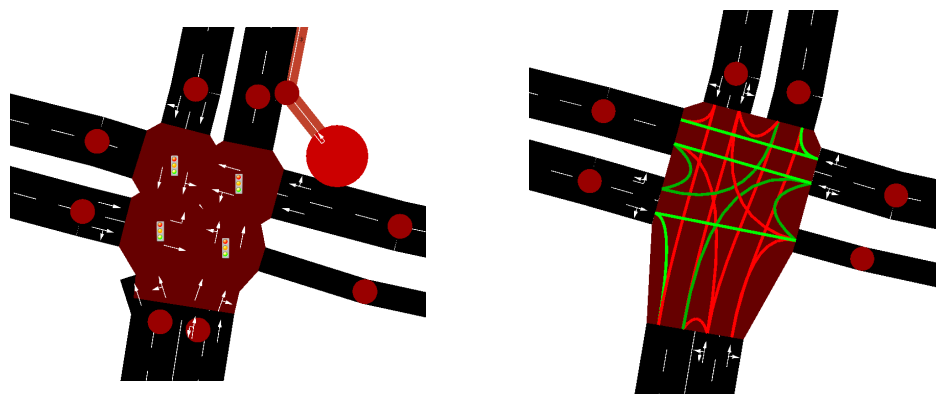
straniti del podatkov, zaradi katerih uporabljene metode pretvorbe ne delujejo optimalno. Tekom razvoja naše rešitve smo odkrili vrsto podatkov, ki kasneje omejujejo optimiziranje faz semaforjev znotraj posameznih križišč. V tem koraku se je treba zavedati, da podatki OSM ne vključujejo informacije o fazah semaforjev, ampak le njihovo lokacijo. Posledično se ob pretvorbi v SUMO podprti format naključno generirajo faze semaforjev, ki seveda ne omogočajo optimalnega pretoka vozil znotraj celotnega cestnega omrežja.

Čiščenje nezaželenih podatkov smo opravili z uporabo programa JOSM. Odstraniti je bilo potrebno vse podatke o kolesarskih in peš poteh. JOSM odstranjenih podatkov ne izbriše iz dane datoteke, ampak jim doda atribut XML, ki označuje izbris. Zato je bilo potrebno napisati preprost Python program¹, ki prebere podano datoteko XML in izbriše vsa vozlišča z omenjenim atributom in shrani očiščeno datoteko. Pretvorbo očiščenih podatkov v SUMO podprti format smo izvedli z uporabo skripte `netconvert`. Skripta ponuja širok nabor vhodnih parametrov za upravljanje poteka pretvorbe. V našem delu smo uporabili ustrezne parametre za izračun dolžine nasprotnih voznih pasov, za zagotovilo enakih dolžin voznih pasov z nasprotnimi in za združitev bližnjih križišč. Prehitevanje vozil z vožnjo po nasprotnem voznem pasu smo omogočili z uporabo prvih dveh parametrov. Zadnji parameter poskrbi, da `netconvert` ustrezno združi bližnja križišča v eno samo. Brez tega navodila so bolj kompleksna križišča, ki povezujejo več cestnih pasov, razdeljena na več manjših križišč, ki vsebujejo individualne faze in se ne zavedajo drug drugega. Posledično faze razdeljenih križišč niso usklajene med seboj in onemogočajo optimalen pretok vozil skozi križišče. Primer križišča, ki ga pretvori `netconvert` brez in z uporabo navedenega parametra, prikazuje slika 4.1. Rezultat izvedene skripte je dokument XML, ki opisuje cestno omrežje in vsebuje vse podatke o cestah, kot tudi o križiščih in semaforjih.

V naslednjem koraku smo pripravili podatke potovanj vozil skozi cestno omrežje. Pri tem smo si pomagali s skripto `randomTrips.py`², ki ustvari niz naključnih potovanj za podano omrežje. To stori z izbiro izvornih in končnih povezav, bodisi enakomerno naključno bodisi z določeno porazdelitvijo. Za vsak posamezni par izvirne in končne povezave se pokliče program `DUAROUTER`, ki izračuna najkrajšo

¹Dostopno na: <https://github.com/kosenina/EVPS/blob/master/util/purge.py>

²Dostopno na: <http://sumo.dlr.de/wiki/Tools/Trip#randomTrips.py>



Slika 4.1: Primer razdeljenega križišča, sestavljenega iz štirih manjših križišč. Slika na desni strani predstavlja isto križišče, le da je v tem primeru združeno v eno samo.

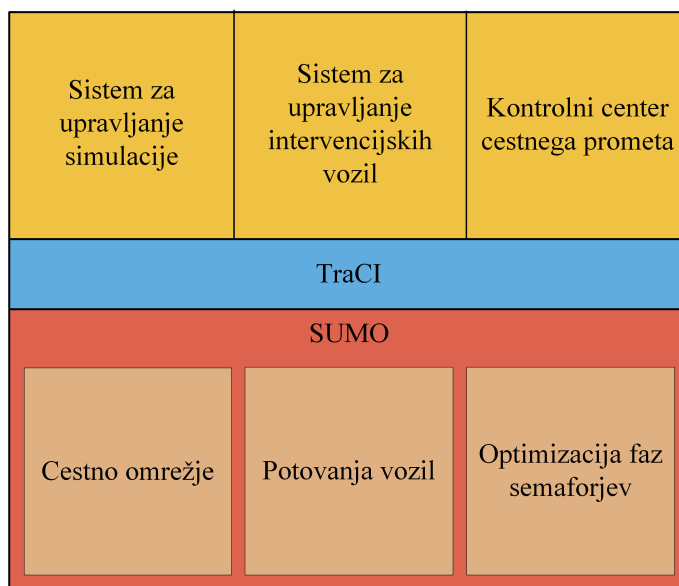
možno pot za podani vozlišči in vrne celoten seznam povezav poti. Potovanja so porazdeljena enakomerno v intervalu, ki ga določa začetek s privzeto vrednostjo 0 in konec s privzeto vrednostjo 3.600 sekund. Število potovanj je definirano s stopnjo ponavljanja, kjer privzeta vrednost znaša eno vozilo na sekundo. Skripta v zaključku shrani vsa generirana potovanja v datoteko XML, katere ime smo podali kot parameter ob zagonu.

Zdaj smo imeli pripravljeno cestno omrežje in potovanja ter smo lahko pričeli s simuliranjem cestnega prometa v SUMO. Z naraščanjem števila aktivnih vozil znotraj cestnega omrežja se pričnejo pojavljati zastoji v semaforiziranih križiščih, ki so posledica neoptimalnih dolžin faz semaforjev. Potrebovali smo optimizirati dolžino faz semaforiziranih križišč z uporabo skripte `tlsCycleAdaptation.py`. Skripta za podano cestno omrežje ter potovanja vozil spremeni trajanje zelenih faz v skladu z Webster's formulo in prilagodi dolžine za zahtevano prometno povpraševanje [22]. Rezultat izvedbe skripte je ponovno datoteka XML s shranjenimi popravki dolžin faz, ki jo navedemo v seznam dodatnih datotek ob zagonu SUMO simulacije.

4.2 Aplikacijska logika

V prejšnjem razdelku je bil opisan postopek priprave podatkov cestnega omrežja in potovanj vozil. Pripravljeni podatki nam omogočajo simulacijo pretoka vozil

znotraj podanega cestnega omrežja in predstavljajo osnovo, na kateri smo zgradili logiko prevzema prometnega signala za intervencijska vozila. Aplikacijska logika simulatorja cestnega prometa za ovrednotenje tehnik prevzema prometnega signala je v poenostavljenem smislu prikazana na sliki 4.2.



Slika 4.2: Poenostavljen prikaz umestitve predlagane rešitve znotraj SUMO in TraCI simulacijskega okolja.

V nadaljevanju sledijo podrobneje opisani sestavni deli predlagane rešitve, kjer vsak opravlja točno določeno opravilo. Rešitev sestoji iz treh pomembnejših gradnikov: sistem za upravljanje simulacije, sistem za upravljanje z intervencijskimi vozili in kontrolni center cestnega prometa.

4.3 Sistem za upravljanja simulacije

Poslovna logika sistema za upravljanje simulacije vključuje branje podanih nastavitvev v obliki JSON ob zagonu simulacije, inicializacijo kontrolnega centra cestnega prometa in sistema za upravljanje z intervencijskimi vozili ter vzpostavitev povezave s SUMO preko TraCI vmesnika. Celoten diagram poteka sistema za upravljanje simulacije prikazuje slika 4.3. Sistem ob inicializaciji podpira branje dveh

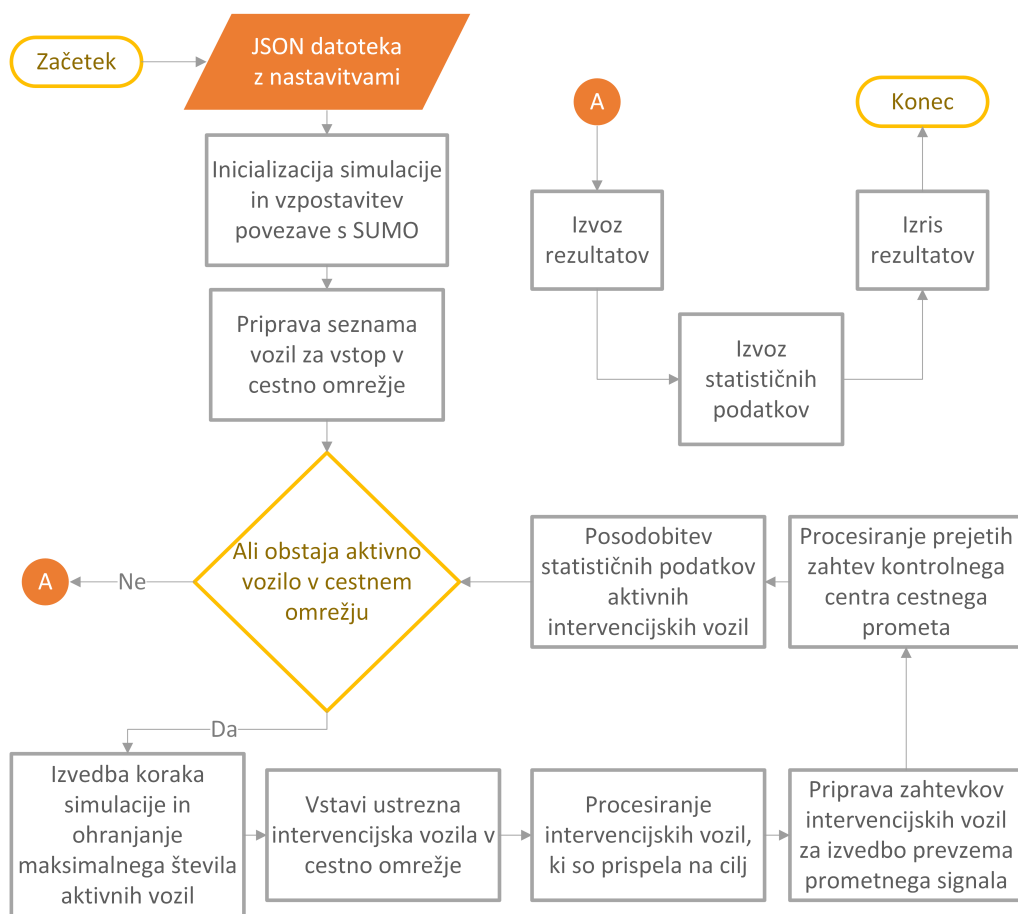
različnih shem datoteke JSON z nastavitvami. Prva shema definira nastavitve izvajanja enkratne simulacije s poljubnim številom voženj intervencijskih vozil. JSON datoteka mora vključevati objekt **Cestno omrežje**, objekt **Generiranje naključnih poti**, niz objektov tipa **Pot**, niz objektov tipa **Vozilo** in objekt **Splošne nastavitve**. Objekt **Cestno omrežje** hrani informacije o datotečni poti datoteke cestnega omrežja in nastavitve iskanja najkrajše poti. Celoten objekt sestavljajo naslednji atributi:

- **Cestno omrežje** – datotečna pot do datoteke cestnega omrežja.
- **Število opornih točk** – celoštevilska vrednost števila vozlišč cestnega omrežja s katerimi si pomaga algoritem ALT pri iskanju najkrajše poti [23].
- **Zasedenost povezav** – opsijski atribut datotečne poti datoteke s podatki o povprečni zasedenosti povezav cestnega omrežja, ki se uporablja pri iskanju najkrajše poti.

Sledi objekt **Generiranje naključnih poti**, s katerim definiramo dolžino časa vstavljanja vozil v cestno omrežje in delež posameznega tipa vozil glede na skupno vsoto vstavljenih vozil. Objekt hrani vrednosti spodnjih atributov:

- **Zaključek** – celoštevilska vrednost koraka simulacije, ob katerem prenehamo vstavljati generirana vozila.
- **Delež osebnih vozil** – celoštevilska vrednost, ki predstavlja delež osebnih vozil med vsemi vstavljenimi generiranimi vozili.
- **Delež motornih vozil** – celoštevilska vrednost, ki predstavlja delež motornih vozil med vsemi vstavljenimi generiranimi vozili.
- **Delež avtobusov** – celoštevilska vrednost, ki predstavlja delež avtobusov med vsemi vstavljenimi generiranimi vozili.
- **Delež taksi vozil** – celoštevilska vrednost, ki predstavlja delež taksi vozil med vsemi vstavljenimi generiranimi vozili.

Niz objektov tipa **Pot** predstavlja seznam različnih možnih poti, med katerimi lahko izbiramo pri pripravi objekta **Vozilo**. Posamezni objekt tipa **Pot** določa



Slika 4.3: Celoten procesni model predlagane rešitve.

pot intervencijskega vozila s podano izhodiščno in končno točko cestnega omrežja. Celoten seznam atributov objekta *Pot* je sestavljen iz:

- *ID* – enolični identifikator poti.
- *Izhodišče* – enolični identifikator vozlišča izhodišča poti.
- *Cilj* – enolični identifikator vozlišča cilja poti.
- *Povratna vožnja* – logična vrednost, ali je vožnja enosmerna ali povratna.
- *Območje prevzema* – celoštevilska vrednost, ki določa območje znotraj katerega vozilo lahko zahteva prevzem prometnega signala.

Niz objektov tipa *Vozilo* navaja seznam intervencijskih vozil, kjer bo posamezno vozilo prevozilo pot, na katero se sklicuje z zgoraj opisanega niza objektov tipa *Pot*. Objekt *Vozilo* predstavlja nastavitve vozila pri iskanju najkrajše poti, prevzemu in ponastavljanju prometnega signala. V primeru uporabe opsijskih atributov *Ponovitev* in *Perioda ponovitve* bo sistem glede na določeno periodo korakov simulacije vstavil intervencijsko vozilo v cestno omrežje. Atribut *Ponovitev* definira končno število vstavljenih vozil. Atributi objekta *Vozilo* so naslednji:

- *ID poti* - enolični identifikator poti.
- *Čas odhoda* – celoštevilska vrednost koraka simulacije, ob katerem vstavimo vozilo v cestno omrežje.
- *Algoritem poti* – naštevni tip, katerega možne vrednosti so: Dijkstra, A zvezdica in ALT.
- *Uteži iskanja poti* - naštevni tip, katerega možne vrednosti so: najkrajša, najhitrejša in najhitrejša glede na povprečni promet.
- *Način prevzema prometnega signala* - naštevni tip, katerega možne vrednosti so: PCK, PPK, PZV in PZP.
- *Način ponastavitve prometnega signala* - naštevni tip, katerega možne vrednosti so navedene v razdelku 4.5.1.

- **Ponovitev** – opcijska celoštevilska vrednost ponovitev vstavljanja vozila v cestno omrežje.
- **Perioda ponovitve** – opcijska celoštevilska vrednost števila korakov simulacije med posameznim vstavljanjem vozila v cestno omrežje.

Zadnji objekt datoteke JSON je **Splošne nastavitve**, s katerim določimo največje možno število aktivnih vozil znotraj cestnega omrežja v danem trenutku. Celoten seznam atributov vključuje:

- **Osnovni direktorij** – znakovni niz, s katerim podamo datotečno pot do korenske datoteke cestnega omrežja.
- **Število aktivnih vozil** – celoštevilska vrednost največjega možnega števila aktivnih vozil simulacije ob vsakem koraku simulacije.
- **Zamik vstavitve** – celoštevilska vrednost najdaljšega možnega zamika ob dodajanju posameznega vozila v cestno omrežje.
- **Omogoči izpis ob iskanju napak** – logična vrednost, ki določa, ali bodo izpisane informacije za namen iskanja napak simulacije.
- **Omogoči izris ob iskanju napak** – logična vrednost, ki določa, ali bodo izrisane informacije za namen iskanja napak simulacije.
- **Pot izvoza statističnih podatkov** – znakovni niz datotečne poti izvoza statističnih podatkov simulacije.
- **Pot izvoza rezultatov** – znakovni niz datotečne poti izvoza rezultatov simulacije.
- **Izris statističnih podatkov** – logična vrednost, ki določa, ali bodo izrisani statistični podatki simulacije.
- **Izvoz statističnih podatkov** – logična vrednost, ki določa, ali bodo izvoženi statistični podatki simulacije.
- **Izvoz samo statističnih podatkov poti** – logična vrednost, ki določa, ali bodo izvoženi le statistični podatki poti intervencijskih vozil.

- Izvoz podatkov kontrolnega centra – logična vrednost, ki določa, ali bodo izvoženi podatki kontrolnega centra cestnega prometa.

Druga shema datoteke JSON definira nastavitve vzporednih izvajanj simulacij. Tovrstni dokument določa število ponovitev niza simulacij s podanimi nastavitvami. Dokument sestoji iz objektov **Cestno omrežje**, **Generiranje naključnih poti** in niza objektov tipa **Pot**, ki so že bili opisani, ter objekta **Splošne nastavitve**, niza objektov **Vozilo** in niza objektov **Način izvedbe**. Objekt **Vozilo** se razlikuje od že opisanega objekta prve sheme v tem, da ne vključuje atributa **Način prevzema prometnega signala** in atributa **Način ponastavitve prometnega signala**. Ta dva atributa sta nadomeščena z nizom objektov **Način izvedbe**. Na ta način omogočamo vzporedno izvajanje simulacij, kjer posamezna simulacija znotraj iteracije vzporednih simulacij uporabi enega izmed načinov izvedbe prevzema oziroma ponastavitve prometnega signala za vsa intervencijska vozila. Objekt **Način izvedbe** vsebuje naslednje attribute:

- ID – enolični identifikator načina izvedbe.
- **Način prevzema prometnega signala** - naštevni tip, katerega možne vrednosti so: PCK, PPK, PZV in PZP.
- **Način ponastavitve prometnega signala** - naštevni tip, katerega možne vrednosti so navedene v razdelku 4.5.1.

Objekt **Splošne nastavitve** vsebuje vse attribute iz istoimenskega objekta prve sheme in dodaja celoštevilski atribut **Število ponovitev**, s katerim definiramo število ponovitev simulacij za vse definirane načine izvedbe.

Ob prebranih nastavitvah se vzpostavi začetno stanje sistema za upravljanje z intervencijskimi vozili, kjer se prebere niz objektov tipa **Vozilo** iz datoteke JSON in se ustrezno definirajo intervencijska vozila. Prav tako se vzpostavi začetno stanje kontrolnega centra cestnega prometa. Sledi zagon simulacije preko TraCI vmesnika, zatem se pripravi vrsta čakajočih intervencijskih vozil, ki jih moramo ob določenem koraku simulacije vstaviti v promet cestnega omrežja. Simulacija se izvaja, dokler obstaja vsaj eno aktivno intervencijsko vozilo znotraj simuliranega cestnega omrežja. Ob vsakem koraku simulacije sistem preverja število aktivnih vozil znotraj cestnega omrežja in poskrbi, da to ne presega vnaprej določenega

števíla. Tovrstno omejevanje največjega števíla aktivnih vozil v danem trenutku omogoča tudi SUMO, vendar nastane težava ob dodajanju intervencijskega vozila, s katerim bi presegli omejitve. V takšnem primeru se lahko zgodi, da bo vozilo dodano z zakasnitvijo oziroma sploh ne bo, kar v našem primeru ni sprejemljivo. Preverjanju števíla aktivnih vozil sledi vstavljanje ustreznih intervencijskih vozil iz vrste čakajočih. Vstavimo le intervencijska vozila, pri katerih se vrednost časa odhoda ujema s trenutno vrednostjo števíca korakov simulacije. Pri dodajanju intervencijskega vozila v cestno omrežje navedemo tudi tip vozila, **Intervencijsko vozilo**, s katerim določimo karakteristike vožnje in obnašanja vozila v cestnem prometu. Tip vozila **Intervencijsko vozilo** definirajo lastnosti, navedene v tabeli 4.1, katerih vrednosti smo nastavili glede na priporočilo razvijalcev programskega paketa SUMO.

Tabela 4.1: Seznam atributov objekta **Intervencijsko vozilo**.

Začetek tabele		
Ime atributa	Vrednost	Opis
accel	3.3	Sposobnost pospeševanja vozila ($v \frac{m}{s^2}$)
decel	5	Sposobnost zaviranja vozila ($v \frac{m}{s^2}$)
maxSpeed	70	Najvišja možna hitrost vozila ($v \frac{m}{s}$)
speedFactor	1.5	Najvišji dovoljeni faktor presežka omejitve hitrosti voznega pasu
length	5.3	Dolžina vozila (v metrih)
width	2	Širina vozila (v metrih)
lcStrategic	100	Prizadevanje za izvedbo menjave voznega pasu. Višja, kot je vrednost, hitreje vozilo menja vozni pas. (območje vrednosti: 1 – neskončno, privzeta vrednost: 1)
lcCooperative	0.0	Prizadevanje sodelovanja ob menjavi voznega pasu. Nižja vrednost predstavlja nižjo raven sodelovanja. (območje vrednosti: 0-1, privzeta vrednost: 1)

Nadaljevanje tabele 4.1		
Ime atributa	Vrednost	Opis
lcSpeedgain	100	Prizadevanje za izvedbo menjave voznega pasu z namenom pridobitve hitrosti. Višje vrednosti pomenijo pogostejše spreminjanje voznega pasu. (območje vrednosti: [0-neskončno], privzeta vrednost: 1)
lcKeepright	100	Prizadevanje za upoštevanje desnih pravil. Višja, kot je vrednost, hitreje vozilo spremeni vozni pas. (območje vrednosti: 0-neskončno, privzeta vrednost: 1)
latAlignment	Left	Prednostna stranska poravnava pri uporabi sublane-modela [24]. (možne vrednosti: levo, desno, sredinsko, kompaktno, poljubno)
lcPushy	1	Prizadevanje bočnega poseganja na druga vozila. (območje vrednosti: 0-1, privzeta vrednost: 0)
lcAssertive	1	Pripravljenost sprejeti krajši sprednji in zadnji razmik na ciljnem pasu. Zahtevana vrzel se deli s to vrednostjo. (območje vrednosti: vsa pozitivna realna števila, privzeta vrednost: 1)
jmDriveAfterRedTime	1.000	Uporaba te nastavitve povzroči kršitev rdeče luči semaforja, če je trajanje rdeče faze nižje od določenega praga. Pri vrednosti 0 bodo vozila vedno prevozila rumeno luč, vendar se bodo poskusila ustaviti pri rdeči luči. Če to vedenje povzroči, da vozilo vozi tako hitro, da varna ustavitve ni več mogoča, potem se vozilo ne bo poskusilo ustaviti. (območje vrednosti: 0-neskončno, privzeta vrednost: 0)

Vstavljanju intervencijskih vozil v cestno omrežje sledi obravnava intervencijskih vozil, ki so prispela na cilj. Ob prispetju na cilj intervencijsko vozilo označimo kot neaktivno. V primeru, ko intervencijsko vozilo prispe na cilj in mora opraviti še povratno pot, ga ponovno vstavimo v vrsto za vstavljanje v cestno omrežje.

Posamezni korak simulacije sproži tudi ustrezno logiko prometnega kontrolnega centra in sistema za upravljanje z intervencijskimi vozili. Ob koncu koraka simulacije se izvede posodobitev statističnih podatkov vseh aktivnih intervencijskih vozil. Statistični podatki zajemajo hitrost vozila, dovoljeno hitrost vožnje in čas čakanja v koloni ob danem koraku simulacije.

V trenutku, ko cestno omrežje ne vsebuje nobenega aktivnega intervencijskega vozila, sledi zadnje opravilo sistema za upravljanje simulacije, izvoz rezultatov in statističnih podatkov ob končani simulaciji. Rezultate in podatke skupaj z vhodnimi podatki simulacije o cestnem omrežju, potovanju vozil in optimizaciji faz semaforjev sistem arhivira in shrani v stisnjeno datoteko ZIP z enoličnim imenom. Arhiviranje posameznih izvedb simulacij omogoča primerjavo rezultatov simulacij z različnimi nastavitvami. Na ta način lahko najdemo nastavitve, s katerimi dosežemo najboljše rezultate.

4.4 Sistem za upravljanje z intervencijskimi vozili

Glavna naloga sistema je razvidna že iz njegovega imena, kjer upravljanje z intervencijskimi vozili vključuje njihovo inicializacijo ob začetku simulacije in hranjenje njihovega stanja tekom simulacije. Ob inicializaciji sistema se najprej preberejo podatki o vseh možnih poteh, definiranih v nastavitveni datoteki. Sledi inicializacija objektov razreda `IntervencijskoVozilo` glede na podane vhodne podatke simulacije. Razred `IntervencijskoVozilo` sestoji iz naslednjih lastnosti:

- **TraCI povezava** – povezava do TraCI, preko katere lahko pridobimo oziroma nastavljamo podatke simuliranega vozila.
- **RTC povezava** – povezava do kontrolnega centra cestnega prometa, preko katere vozilo pošilja zahteve za prevzem oziroma ponastavitev prometnega signala.

- **Ime poti** – referenca na enolični identifikator poti, definiran v vhodnih podatkih simulacije.
- **Izhodišče** – enolični identifikator vozlišča cestnega omrežja, od koder se vozilo odpravi.
- **Cilj** – enolični identifikator vozlišča cestnega omrežja, do koder mora vozilo prispeti.
- **Odhod** – celoštevilska vrednost koraka simulacije, ob katerem se vozilo odpravi na pot.
- **Seznam povezav** – seznam povezav celotne poti vozila.
- **Preostale povezave** – seznam povezav, ki jih vozilo mora še prevoziti na svoji poti.
- **Seznam križišč** – celoten seznam preostalih semaforiziranih križišč na poti vozila.
- **Indeks trenutne povezave** – enolični identifikator povezave, kjer se v danem trenutku vozilo nahaja.
- **Povratna vožnja** - logična vrednost, ali je vožnja enosmerna ali povratna.
- **Barva** – informacija o barvi vozila.
- **Način prevzema prometnega signala** - naštevni tip, katerega možne vrednosti so: PCK, PPK, PZV in PZP.
- **Način ponastavitve prometnega signala** - naštevni tip, katerega možne vrednosti so navedene v razdelku 4.5.1.
- **Algoritem poti** – naštevni tip, katerega možne vrednosti so: Dijkstra, A zvezdica in ALT.
- **Uteži iskanja poti** - naštevni tip, katerega možne vrednosti so: najkrajša, najhitrejša in najhitrejša glede na povprečni promet.
- **Statistika** – objekt, namenjen beleženju statističnih podatkov.

- **Aktivno** – logična vrednost, ali je vozilo aktivno. Aktivno vozilo je tisto, ki je še na poti med izhodiščem in ciljem.
- **Krmilnik poslanih zahtevkov** – interna logika vozila z namenom hranjenja stanja poslanih zahtevkov za prevzem oziroma ponastavitev prometnega signala.

Za vsak objekt intervencijskega vozila je potrebno izračunati njegovo pot. Pot se izračuna z uporabo vmesnika iskanja poti, ki na podlagi lastnosti **Algoritem poti** uporabi ustrezen algoritem z utežmi, ki jih navaja lastnost **Uteži iskanja poti**. Vmesnik iskanja poti ponuja tri različne algoritme za izračun poti, in sicer: Dijkstra, A zvezdica in ALT [23]. Vsak izmed naštetih algoritmov implementira logiko za izračun najkrajše, najhitrejša in najhitrejša poti glede na povprečno zasedenost povezav. Različne algoritme smo implementirali z namenom najhitrejšega izračuna poti. V začetni fazi razvoja naše rešitve smo načrtovali računanje optimalne poti na vsakem n -tem koraku simulacije, s čimer bi omogočali izbiro najboljše poti v danem trenutku glede na gostoto cestnega prometa. Kasneje se je izkazalo, da takšen pristop ne doprinese znatnega izboljšanja celotnega časa poti vozila in smo se v nadaljevanju odločili izračunati pot vozila le ob njegovem odhodu.

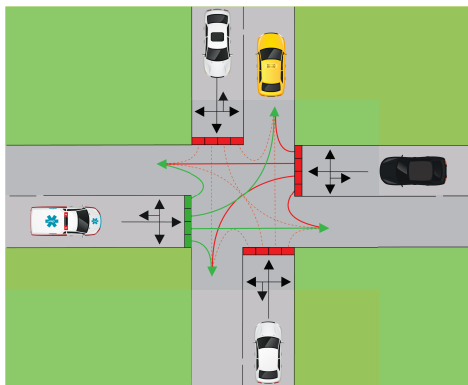
Razred **IntervencijskoVozilo** definira tudi metode za pošiljanje zahtevkov prevzema oziroma ponastavljanja prometnega signala kontrolnemu centru cestnega prometa. Ob vsakem koraku simulacije aktivno intervencijsko vozilo izračuna in posodobi vrednosti preostalih povezav in semaforiziranih križišč na njegovi poti. V primeru, ko vozilo v danem koraku simulacije prevozi semaforizirano križišče, to pošlje zahtevek kontrolnemu centru za ponastavitev prometnega signala. V istem koraku simulacije sledi, če je potrebno, izračun in priprava zahtevka za prevzem prometnega signala. Razred **IntervencijskoVozilo** implementira naslednje štiri načine prevzema prometnega signala:

- Prevzem celotnega križišča (PCK).
- Prevzem poti v križišču (PPK).
- Prevzem z zelenim valom (PZV).
- Prevzem z zelenim valom na celotni poti (PZP).

Opis posameznega izmed načinov prevzema prometnega signala sledi v naslednjih razdelkih.

4.4.1 Prevzem celotnega križišča (PCK)

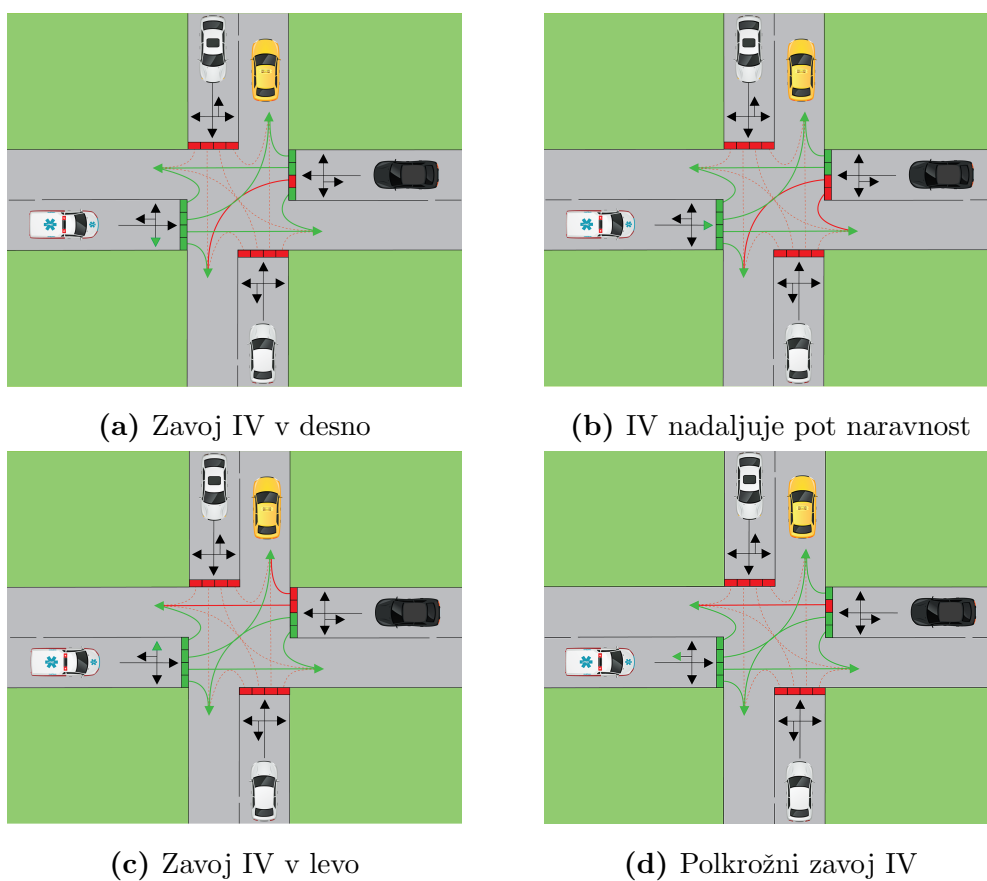
Zahtevek za PCK lahko intervencijsko vozilo pošlje kontrolnemu centru cestnega prometa znotraj območja dovoljenega prevzema prometnega signala pri posameznem semaforiziranem križišču. Vrednost dovoljenega območja je navedena v metrih in je definirana v vhodnih nastavitvah simulacije s privzeto vrednostjo 250 metrov. Ta razdalja v veliki večini primerov zadostuje za izpraznitev poti intervencijskega vozila na poti skozi križišče. Poleg pošiljanja zahtevka intervencijsko vozilo interno shrani podatek o poslani zahtevi za podano semaforizirano križišče. Na ta način vozilo v naslednjih korakih simulacije, dokler se nahaja znotraj dovoljenega območja prevzema prometnega signala danega križišča, ne bo ponavljajoče pošiljalo zahtevkov. Izjema je situacija, ko je poslani zahtevek za prevzem prometnega signala zavrnjen s strani kontrolnega centra cestnega prometa. V tem primeru vozilo ponavljajoče pošilja zahtevke, dokler se nahaja znotraj območja prevzema. Zahtevek za PCK sestoji iz podatkov o dolžini razdalje vozila do semaforiziranega križišča, enoličnega identifikatorja križišča, enoličnega identifikatorja vozila, vhodnega in izhodnega voznega pasu v oziroma iz križišča. Novo stanje semaforjev v križišču izračuna kontrolni center na podlagi prejetih podatkov tako, da se nastavi zelena luč v smeri intervencijskega vozila, za vse preostale smeri pa nastavi rdečo luč. Grafična ponazoritev prevzema prometnega signala je upodobljena na sliki 4.4. Dolžina faze semaforja ob prevzemu prometnega signala znaša 30 sekund.



Slika 4.4: Prikaz stanja faz semaforjev ob izvedbi prevzema celotnega križišča.

4.4.2 Prevzem poti v križišču (PPK)

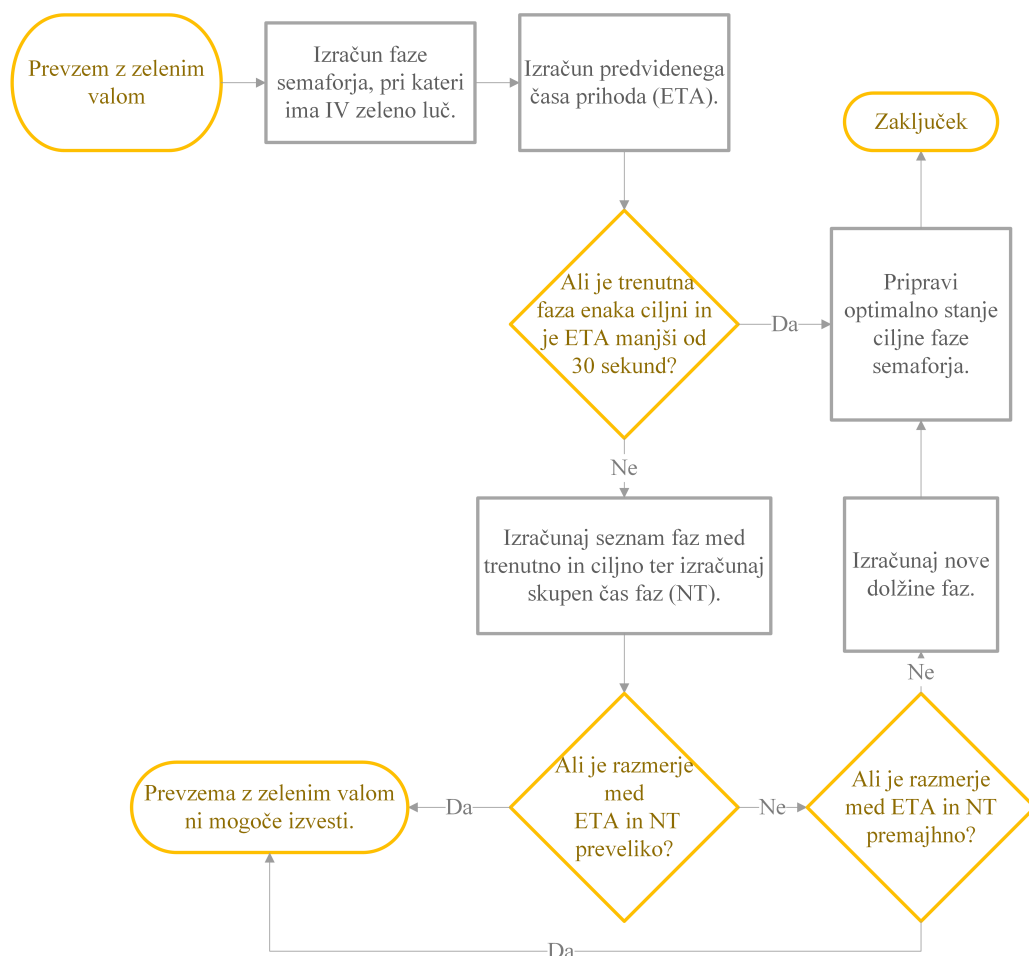
Slednji način se od prejšnjega razlikuje samo v izračunu novega stanja semaforja ob prejemu zahtevku. V tem primeru kontrolni center cestnega prometa stremi k omogočanju maksimalnega pretoka vozil skozi križišče ob vožnji intervencijskega vozila. Pomanjkljivost prejšnjega načina je v prepovedani vožnji vozil skozi križišče v nasprotni smeri intervencijskega vozila. Na tem mestu se moramo zavedati, da v primeru nastavljenih zelenih luči za vse vozne pasove nasproti vozečih vozil lahko potencialno onemogočimo hitro in varno vožnjo intervencijskega vozila skozi križišče. Težavo lahko rešimo z dovoljeno vožnjo nasproti vozečih vozil v smeri, ki ne ovira vožnje intervencijskega vozila, in na ta način dosežemo maksimalen pretok vozil skozi križišče. Vse možne kombinacije faz semaforjev glede na smer intervencijskega vozila ob vožnji skozi križišče prikazuje slika 4.5. V določenih združenih križiščih težje izračunamo optimalno novo stanje semaforja zaradi pomanjkljivih podatkov. Lahko se zgodi, da pri računanju stanja nimamo podatka o tem, ali določena povezava vhodnega voznega pasu in izhodnega, ovira vožnjo intervencijskega vozila. V takšnem primeru nastavimo rdečo luč, saj je varna vožnja intervencijskega vozila bolj pomembna kot pa maksimalen pretok vozil skozi križišče.



Slika 4.5: Prikaz različnih stanj faz semaforjev ob izvedbi prevzema posamezne poti v križišču.

4.4.3 Prevzem z zelenim valom (PZV)

Ideja prevzema z zelenim valom je ustvarjanje tako imenovanega zelenega vala za intervencijsko vozilo na nujni vožnji. Vožnja znotraj zelenega vala zahteva minimalno število zmanjševanj hitrosti intervencijskega vozila, seveda pa morajo ta še vedno zmanjšati svojo hitrost v križiščih pri zavijanju bodisi v levo bodisi v desno. PZV se izvaja na daljši razdalji med intervencijskim vozilom in križiščem, kot v načinih, opisanih pred tem. Postopek izračuna ponazarja slika 4.6. Območje dovoljenega prevzema je znotraj razdalje 1,5 kilometra od posameznega semaforiziranega križišča. Pri obravnavi zahtevka za PZV je potrebno za intervencijsko vozilo znotraj dovoljenega območja izračunati indeks ciljne faze semaforja, to je tista, pri kateri ima intervencijsko vozilo dovoljeno nadaljevanje vožnje v njegovi smeri. Izračunati je potrebno tudi predviden čas prihoda intervencijskega vozila do križišča. V primeru, da je trenutna faza semaforja enaka ciljni in je predviden čas prihoda manjši od 30 sekund, kontrolni center cestnega prometa samo zadoštno podaljša trajanje aktualne faze semaforja. Če prejšnji pogoj ni izpolnjen, izračunamo seznam faz med trenutno in ciljno fazo ter seštejemo njihovo skupno trajanje. Seštevek skupnega časa nam pove, koliko časa mora preteči, da se bo na semaforju pojavila ciljna faza. V naslednjem pogoju preverimo razmerje med predvidenim časom prihoda in potrebnim časom do ciljne faze. Če je razlika prevelika oziroma premajhna, ne moremo izvesti PZV. Premajhno razmerje podanih časov povzroči znatno zmanjšanje trajanja faz med trenutno in ciljno fazo. Hitro preklapljanje med fazami ni varno v cestnem prometu in povzroči zmedo ter poveča možnost nastanka nesreče v cestnem prometu. Preveliko razmerje v primeru majhnega števila vmesnih faz med trenutno in ciljno fazo predstavlja potrebo po znatnem podaljšanju časa trajanja vmesnih faz. Pri tem se moramo zavedati, da podaljševanje faz, pri katerih noben vozni pas nima zelene luči ni smiselno in nam tako preostane le podaljševanje faz, ki dovoljujejo pretok vozil skozi križišče. Prav tako podaljševanje določene faze povzroči daljše čakanje preostalih vozil na zeleno luč, zato v tem primeru ni smiselno izvesti PZV. Preveliko razmerje ob večjem številu vmesnih faz načeloma omogoča izvedbo celotnega cikla faz ter izvedbo vmesnih faz med trenutno in ciljno fazo v naslednjem ciklu. Programska oprema SUMO ne omogoča urejanja dolžine trajanja faz za posamezni cikel, zato smo v naši implementaciji poenostavili rešitev in izvajamo PZV le v primeru, ki ne



Slika 4.6: Postopek obravnave prevzema z zelenim valom.

vsebuje vmesnih ciklov. Ob ustreznem razmerju podanih časov lahko izračunamo optimalne dolžine vmesnih faz. Pri tem vrednosti smiselno omejimo glede na stanje faze. Trajanje faze brez zelene luči omejimo s spodnjim časom treh sekund in zgornjim časom petih sekund. Preostale faze so omejene znotraj območja od 5 do 60 sekund. Stanje ciljne faze izračunamo po postopku, opisanem v načinu PPK.

Prevzem z zelenim valom ne zagotavlja proste poti intervencijskim vozilom, saj obstaja možnost, da zahtevka ni mogoče izvesti iz zgoraj navadnih razlogov oziroma je bil izračun predvidenega časa prihoda napačen. V takšnem primeru se izvede prevzem poti v križišču. Le s kombinacijo obeh načinov lahko zagotovimo

intervencijskemu vozilu prosto in varno pot skozi križišče.

4.4.4 Prevzem z zelenim valom na celotni poti (PZP)

Zadnji način se za razliko od preostalih izvede ob samem odhodu intervencijskega vozila. V trenutku odhoda izračunamo za vsa semaforizirana križišča na poti trajanje vseh faz posameznega semaforja tako, da bo vozilo ob prihodu v križišče prispelo na prosto pot skozi križišče. Na ta način tempiramo zeleni val za intervencijsko vozilo na celotni poti. Pri semaforiziranih križiščih v bližini lokacije odhoda intervencijskega vozila težje izračunamo optimalne čase trajanja posameznih faz semaforja iz povsem istih razlogov, kot smo jih navedli v prejšnjem razdelku. Bolj kot so semaforizirana križišča od lokacije odhoda oddaljena, lažje izračunamo novi čas trajanja posameznih faz semaforja. Izvedba PZP je lahko za posamezno semaforizirano križišče neuspešna in v takšnem primeru poskrbimo, da se za intervencijsko vozilo izvede prevzem poti v križišču. Na ta način zagotovimo prosto vožnjo skozi križišča ne glede na uspešnost PZP.

4.5 Kontrolni center cestnega prometa

Kontrolni center cestnega prometa sprejema zahteve intervencijskih vozil za prevzem oziroma ponastavitev prometnega signala in jih vstavi v ustrezno vrsto. Ob vsakem koraku simulacije kontrolni center najprej obdelava zahteve v vrsti za ponastavitev prometnega signala. Zatem sledi obdelava zahtevkov v vrsti za prevzem prometnega signala. Kot zadnji se obravnavajo čakajoči zahtevki za prevzem prometnega signala.

4.5.1 Ponastavitev prometnega signala

Pri obdelavi zahtevka za ponastavitev prometnega signala najprej preverimo, ali je zahtevek poslalo intervencijsko vozilo, ki je pred tem tudi prevzelo signal podanega križišča. Če to ni isto vozilo, potem prekinemo obdelavo zahtevka in ga odstranimo iz vrste. Drugače nadaljujemo z obdelavo in glede na vsebino zahtevka izvedemo enega izmed dveh načinov ponastavitve prometnega signala. Pri prvem načinu nastavimo privzeti program in fazo semaforja, ki je bila v uporabi

pred prevzemom prometnega signala. Drugi način predstavlja boljšo rešitev, kjer poiščemo znotraj privzetega programa semaforja fazo, s katero dovolimo vožnjo skozi križišče največjemu številu vozil. Pri obeh načinih zamenjave faze semaforja se moramo zavedati, da prehod iz trenutne faze v naslednjo ni nujno veljaven po cestnoprometnih predpisih. Prehod faze semaforja iz zelene na rdečo za poljubni vozni pas ni veljaven. S tem razlogom ob ponastavitvi signala semaforja vnesemo vmesno fazo, s katero izvedemo pravilen prehod faz semaforja. Vmesno fazo semaforja izračunamo iz trenutne, kjer zamenjamo vse zelene signale z rumenimi. V zadnjem koraku obdelave zahtevkov odstranimo iz vrste in preidemo na obdelavo naslednjega, če le ni vrsta zahtevkov prazna.

4.5.2 Prevzem prometnega signala

Preden opišemo postopek obdelave zahtevka za prevzem prometnega signala, je potrebno pojasniti, na kakšen prioriteten način kontrolni center loči prejete zahtevke. V prejšnjem razdelku smo navedli štiri različne načine prevzema prometnega signala, ki jim kontrolni center določi prioriteto, kot je navedeno v tabeli 4.2. Prioriteta načina se upošteva v konfliktnih situacijah, kot je obdelava zahtevka za prevzem prometnega signala križišča, ki je že prevzeto. Način z višjo prioriteto ima v takšnih situacijah prednost pri prevzemu prometnega signala. Tovrstno pravilo se navadno uporablja v primeru, ko intervencijsko vozilo na daljši razdalji izvede enega izmed načinov prevzema z nižjo prioriteto. Za tem to isto intervencijsko vozilo pripelje v območje dovoljenega prevzema z višjo prioriteto, pri čemer se v primeru, če v tistem trenutku aktivna faza semaforja ne omogoča proste vožnje skozi križišče, pošlje zahtevek enega izmed načinov prevzema prometnega signala s prioriteto dve. Kontrolni center v takšni situaciji prioritetno obravnava prejeti zahtevek in ga tudi izvede.

Obravnava zahtevka za prevzem prometnega signala je nekoliko bolj kompleksen postopek. V prvem koraku vzamemo iz vrste najstarejši zahtevek. Nato preverimo, ali za podani zahtevek drži vsaj eden izmed naslednjih treh pogojev:

- Signal semaforiziranega križišča trenutno ni v prevzemu.
- Signal semaforiziranega križišča je trenutno prevzet, vendar je intervencijsko vozilo obravnavanega zahtevka bližje križišču.

Prioriteta	Način
1	Prevzem z zelenim valom (PZV).
	Prevzem z zelenim valom na celotni poti (PZP).
2	Prevzem celotnega križišča (PCK).
	Prevzem poti v križišču (PPK).

Tabela 4.2: Prioritetna razvrstitev tehnik prevzema prometnega signala.

- Signal semaforiziranega križišča je trenutno prevzet s strani istega vozila, katerega zahtevek obdelujemo, vendar tokrat z višjo prioriteto načina prevzema prometnega signala.

Če nobeden izmed navedenih pogojev ne drži, prenehamo z obdelavo zahtevka in pošiljatelju odgovorimo s preklicem zahtevka. Pozitiven rezultat preverjanja pogojev pomeni nadaljevanje obravnave zahtevka, kjer se ta veji glede na prioriteto načina prevzema. Pri načinu z nižjo prioriteto moramo najprej shraniti trenutno stanje semaforja za podano križišče, nato nastavimo nov program semaforja glede na prejete podatke zahtevka.

Nadaljujemo s shranjevanjem novega stanja trenutno prevzetih križišč. Če je križišče že na seznamu trenutno prevzetih križišč, potem glede na prioriteto trenutno shranjenega zahtevka izvedemo eno izmed naslednjih dveh akcij:

- Trenutno shranjeni zahtevek s prioriteto ena premaknemo na seznam čakajočih zahtevkov pod pogojem, da ne gre za zahtevek s strani istega intervencijskega vozila.
- Trenutno shranjeni zahtevek s prioriteto dve prekličemo in ustrezno obvestimo intervencijsko vozilo, odgovorno za podani zahtevek.

Za tem le še shranimo novo stanje trenutnega zahtevka v veljavi in pošljemo intervencijskemu vozilu poslanega zahtevka odgovor o sprejetem in uspešno izvedenem zahtevku.

4.5.3 Obdelava čakajočih zahtevkov za prevzem prometnega signala

Čakajoči zahtevki so lahko le tisti z nižjo prioriteto, ki jih je kontrolni center zaradi naknadne izvedbe prevzema z višjo prioriteto premaknil v vrsto čakajočih. Ob vsakem koraku simulacije kontrolni center obravnava vse čakajoče zahtevke v vrsti. V primeru, da križišče posameznega zahtevka ni več v stanju prevzema, potem takšen zahtevek premaknemo v vrsto za prevzem prometnega signala. Drugače ne storimo ničesar in na ta način čakamo za posamezni čakajoč zahtevek, da se sprostí stanje prevzema za podano križišče.

Poglavje 5

Evalvacija tehnik prevzema v cestnem omrežju Ljubljane

Preden lahko sodimo o prispevku tehnik prevzema prometnega signala v cestnem omrežju Ljubljane k hitrejšemu prihodu intervencijskega vozila na cilj, jih moramo preizkusiti v simulatorju cestnega prometa. To poglavje je namenjeno razpravi o testiranju implementiranih tehnik ter analizi in ovrednotenju pridobljenih rezultatov.

Pri testiranju smo strmeli k uporabi čim bolj točnih in realnih podatkov o cestnem omrežju in prometu. Uporabili smo cestno omrežje mesta Ljubljana, ki vsebuje natančne podatke o cestah, voznih pasovih, lokacijah semaforjev itd. Programe semaforjev smo morali pripraviti sami, saj na žalost nismo prejeli pooblastila za uporabo realnih podatkov semaforiziranih križišč. Faze posameznega programa semaforja smo tako pripravili naključno in jih kasneje optimizirali glede na prometno povpraševanje.

Idealna izvedba testiranja bi vključevala tudi realne podatke o cestnem prometu, s pomočjo katerih bi lahko simulirali pretok vozil v cestnem omrežju, ki bi bil primerljiv realnemu. Izvedba takšne simulacije zahteva podatke o urnem oziroma dnevnem pretoku vozil za vsako posamezno cesto v cestnem omrežju. Ljubljana je trenutno najboljše pokrito slovensko mesto s tovrstnimi merilniki, vendar še vedno občutno premalo za izvedbo takšne simulacije. S tem razlogom smo cestno povpraševanje pripravili naključno z uporabo uteži, s katerimi smo označili bolj

prometne odseke. Na ta način smo pridobili prometno povpraševanje, ki je primerljivo z realnim.

5.1 Metodologija testiranja in analiziranja rezultatov

Testiranje smo izvedli v dveh fazah. V prvi fazi smo preizkusili tehnike prevzema prometnega signala na manjšem delu cestnega omrežja Ljubljane z namenom pridobitve optimalne vrednosti **območja prevzema**. Ta vrednost določa razdaljo, znotraj katere lahko intervencijsko vozilo pošlje zahtevek za prevzem prometnega signala in je skupna vsem implementiranim tehnikam prevzema. Ugotovitve iz prve faze testiranja smo upoštevali pri izvedbi druge faze, kjer smo uporabili širše območje cestnega omrežja Ljubljane. Pri obeh fazah testiranja smo opravili tudi analizo rezultatov, kjer smo primerjali čas vožnje intervencijskega vozila in njegovo povprečno hitrost ter čas čakanja pri posamezni poti glede na uporabljeno tehniko prevzema prometnega signala. Ocenjevali smo tudi slabosti tehnik v smislu števila čakajočih vozil v križiščih ob izhodu intervencijskega vozila iz križišča.

5.2 Testno okolje

Testiranje smo izvajali z uporabo storitvene platforme Microsoft Azure, kjer smo zakupili instanco navideznega stroja z operacijskim sistemom Windows Server 2016. Instanca je vsebovala centralno procesno enoto z osmimi virtualnimi jedri in 16 GB delovnega spomina, kjer je bila nameščena tudi vsa potrebna programska oprema za izvajanje simulacij, in sicer:

- SUMO; razvojna različica r26295 iz dne 10.1.2017.
- TraCI; razvojna različica r26295 iz dne 10.1.2017.

5.3 Primerjava vrednosti območja prevzema (faza 1)

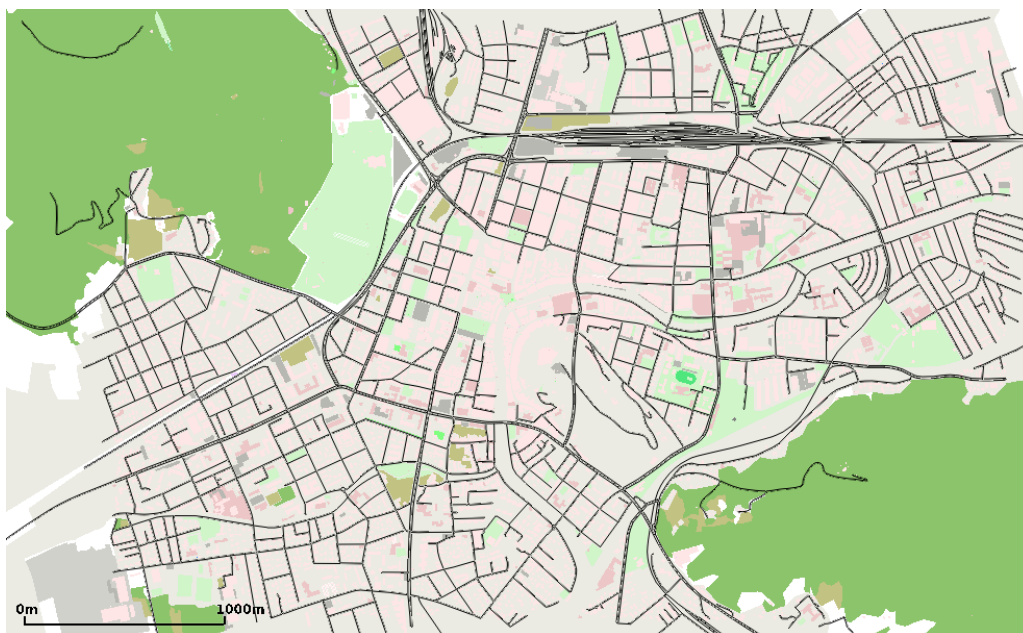
Tehnike prevzema prometnega signala, opisane v prejšnjem poglavju, imajo skupno lastnost, tj. območje prevzema, ki določa razdaljo, znotraj katere lahko intervencijsko vozilo pošlje zahtevek za prevzem prometnega signala. Vrednost razdalje vpliva na uspešnost posamezne tehnike in na zgostitev prometa v križišču. Čim večje je območje prevzema, tem prej lahko intervencijsko vozilo prevzame signal semaforja in posledično tudi hitreje prevozi križišče, a hkrati se pričnejo daljšati kolone vozil na voznih pasovih z rdečo lučjo. Ravno obratno velja pri uporabi čim manjšega območja prevzema, znotraj katerega lahko intervencijsko vozilo pošlje zahtevek. Cilj testiranja je s pomočjo analize rezultatov ugotoviti, pri kateri vrednosti območja prevzema se tehnike najboljše izkažejo.

V obsegu testiranja smo tehnike prevzema prometnega signala preizkušali z uporabo naslednjih vrednosti območja prevzema: 100, 150, 200, 250 in 300 metrov.

Testiranje smo izvedli na manjšem cestnem omrežju Ljubljane, ki ga prikazuje slika 5.1 in ki vključuje 290 km cest in 147 semaforiziranih križišč. Nekatere ceste vsebujejo več kot en vozni pas, zato je skupna razdalja vseh voznih pasov daljša od skupne dolžine vseh cest za 43 km in v celoti znaša 333 km. Tehnike prevzema prometnega signala smo preizkušali na šestih različnih poteh, katerih lastnosti so navedene v tabeli 5.1. Za vsako pot smo izračunali tudi čas vožnje in povprečno hitrost, kjer smo predpostavili, da navadno vozilo prevozi celotno pot z najvišjo dovoljeno hitrostjo.

Tehnike prevzema prometnega signala smo preizkušali pri štirih različnih gostotah cestnega prometa. Gostoto prometa uravnavamo glede na število aktivnih vozil znotraj cestnega omrežja. Pri tem smo z opazovanjem predhodnih simulacij izbrali vrednosti, ki spadajo znotraj obsega redkega in zgoščenega prometa. Redek promet je takšen, ki omogoča tekočo vožnjo skozi cestno omrežje z majhno verjetnostjo nastanka zastojev. Zgoščen promet pa predstavlja prometno konico, ko je na cestiščih največje število vozil in posledično z veliko verjetnostjo nastajajo zastoji.

Celotno testiranje se je izvajalo 7 dni in v celoti obsega 120.000 simulacij. To pomeni, da smo za posamezno pot izvedli 20.000 simulacij, kar nanese 4.000



Slika 5.1: Vizualizacija cestnega omrežja Ljubljane, uporabljenega pri testiranju in primerjavi različnih vrednosti območja prevzema.

	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Pot 4	Pot 5	Pot 6
Število semaforiziranih križišč	22	21	9	26	18	26
Dolžina poti	5.212 m	8.843 m	3.276 m	8.227 m	9.832 m	7.104 m
Predviden čas vožnje ^a	436 s	703 s	217 s	595 s	727 s	514 s
Povprečna hitrost vožnje ^a	43,0 km/h	45,2 km/h	54,3 km/h	49,7 km/h	48,6 km/h	49,7 km/h

^aIzračunani podatki

Tabela 5.1: Podatki o poteh, na katerih smo preizkušali različne tehnike prevzema prometnega signala.

simulacij za posamezno tehniko prevzema prometnega signala pri določeni poti. Če to vrednost delimo še s številom različnih vrednosti gostote cestnega prometa (4) in številom različnih vrednosti za razdaljo, znotraj katere lahko intervencijsko vozilo pošlje zahtevek (5), lahko ugotovimo, da smo izvedli 200 ponovitev simulacij za posamezno kombinacijo: poti, gostote prometa, tehnike in območja prevzema.

5.3.1 Povprečni čas vožnje intervencijskega vozila

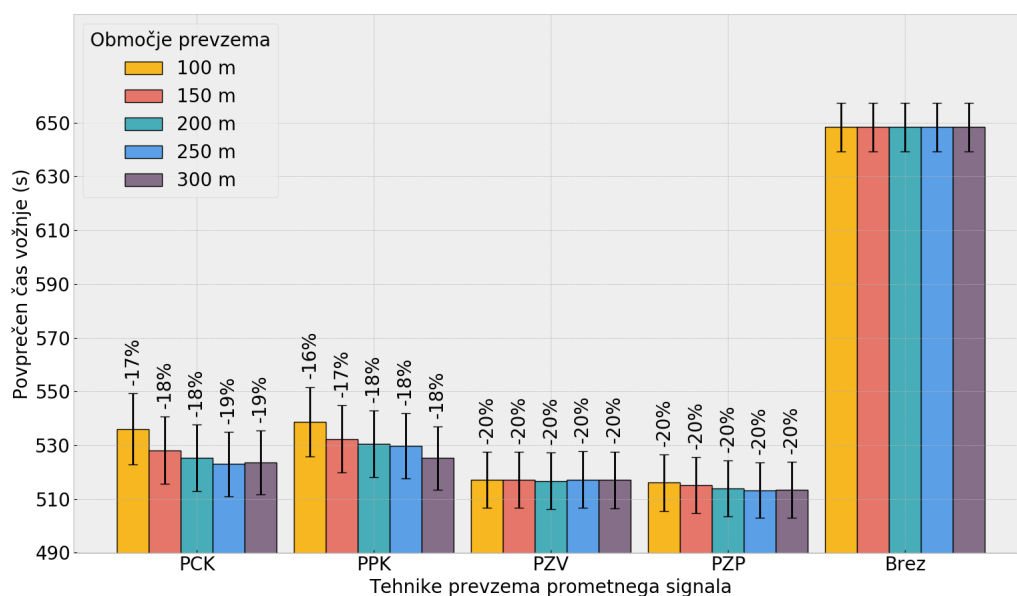
Ob zaključenem testiranju smo iz rezultatov izluščili informacije, s katerimi lahko primerjamo uspešnost tehnik prevzema prometnega signala pri različnih vrednostih območja prevzema. Pri tem nas najbolj zanima, kako posamezna vrednost vpliva na povprečni čas vožnje intervencijskega vozila in na zgoščevanje prometa v semaforiziranih križiščih. Tabela 5.2 prikazuje spremembo povprečnega časa vožnje za posamezno pot glede na uporabljeno vrednost območja, znotraj katerega lahko intervencijsko vozilo pošlje zahtevek. Na tem mestu je treba omeniti, da sprememba vrednosti minimalno vpliva na čas vožnje intervencijskega vozila pri uporabi tehnike prevzema z zelenim valom oziroma z zelenim valom na celotni poti. Pri teh dveh tehnikah se izvede prevzem poti v križišču le v robnih primerih, ko izvedba privzetega prevzema ni bila uspešna. Iz tega razloga sta ti dve tehniki izvzeti iz obravnavanja rezultatov v tabeli. Povprečni čas vožnje intervencijskega vozila pri uporabi tehnike prevzema celotnega križišča (PCK) in tehnike prevzema poti v križišču (PPK) lahko primerjamo s povprečnim časom vožnje intervencijskega vozila brez uporabe tehnik prevzema prometnega signala, t.j. le z uporabo svetlobni in zvočnih signalov. Iz podatkov v tabeli lahko opazimo, da sta tehniki PCK in PPK uspešnejši ne glede na vrednost območja prevzema. Hkrati lahko opazimo tudi, da je posamezna tehnika uspešnejša pri večjem dovoljenem območju prevzema prometnega signala.

Uspešnost posamezne tehnike pri uporabi določene vrednosti območja prevzema lažje primerjamo s pomočjo grafa na sliki 5.2. Graf vključuje podatke vseh različnih gostot cestnega prometa. Opazimo lahko, da vrednost območja prevzema zanemarljivo vpliva na uspešnost tehnik PZV oziroma PZP, medtem ko ta vrednost vpliva na končni čas vožnje vozila z uporabo tehnike PCK in PPK.

Zanimiva je primerjava uspešnosti posamezne tehnike prevzema pri različnih vrednostih območja prevzema v primeru najmanjše oziroma največje prometne

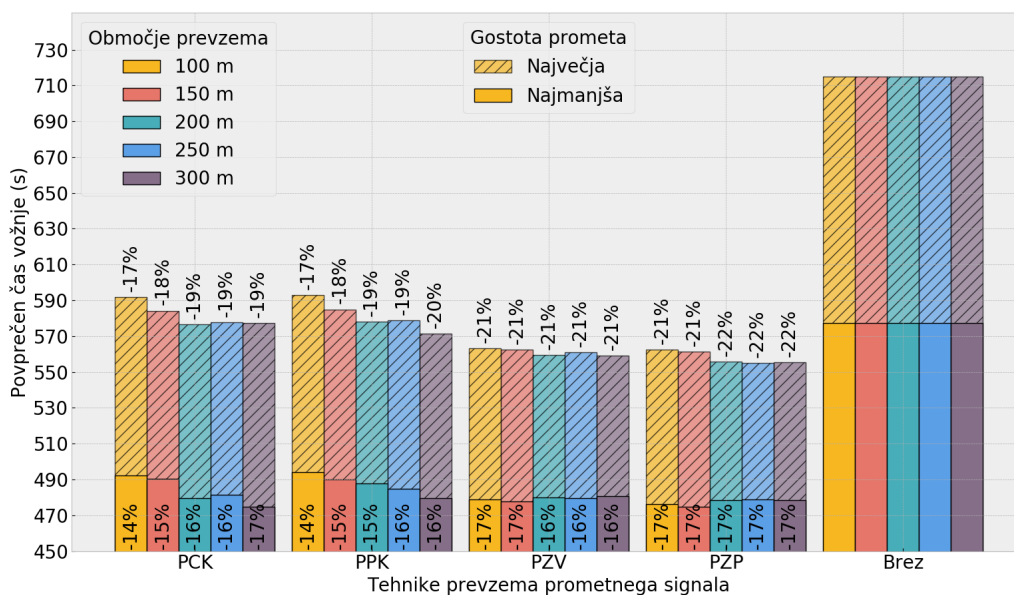
Uporabljena tehnika	Območje prevzema	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Pot 4	Pot 5	Pot 6
Prevzem celotnega križišča (PCK)	100 m	423 s	682 s	175 s	672 s	695 s	615 s
	150 m	422 s	656 s	171 s	679 s	679 s	622 s
	200 m	401 s	646 s	169 s	691 s	691 s	637 s
	250 m	392 s	643 s	168 s	683 s	653 s	643 s
	300 m	386 s	637 s	169 s	690 s	647 s	637 s
Prevzem poti v križišču (PPK)	100 m	417 s	688 s	178 s	689 s	700 s	631 s
	150 m	404 s	666 s	174 s	692 s	677 s	640 s
	200 m	394 s	652 s	172 s	695 s	671 s	645 s
	250 m	390 s	651 s	171 s	698 s	660 s	646 s
	300 m	386 s	644 s	171 s	686 s	656 s	630 s
Brez	-	464 s	842 s	212 s	798 s	851 s	739 s

Tabela 5.2: Rezultati testiranja tehnik prevzema prometnega signala pri različnih vrednostih območja prevzema in povprečni gostoti cestnega prometa.



Slika 5.2: Primerjava povprečnega časa vožnje IV neglede na gostoto cestnega prometa. Posamezni stolpci predstavljajo povprečni čas vožnje IV z uporabo posamezne tehnike pri različnih vrednostih območja prevzema. Navpična črta na vrhu stolpcev predstavlja 95% interval zaupanja povprečnega časa vožnje, medtem ko vrednost v odstotkih nad stolpci predstavlja izboljšavo glede na povprečni čas vožnje IV brez uporabe tehnike prevzema.

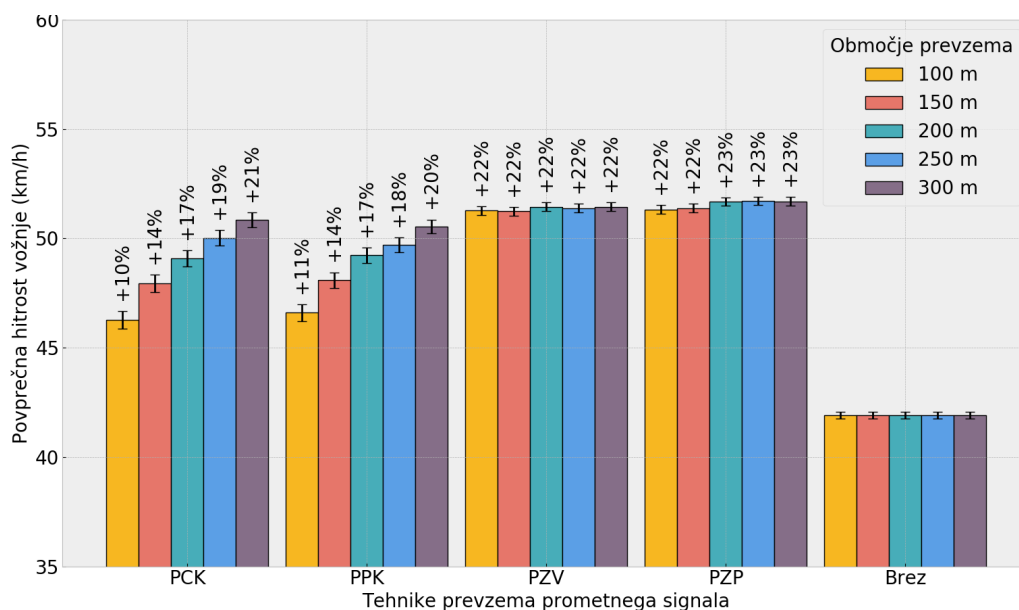
obremenitve na grafu slike 5.3. Opazimo lahko, da je posamezna tehnika prevzema učinkovitejša v gostejšem cestnem prometu. Vpliv vrednosti območja prevzema na povprečni čas vožnje intervencijskega vozila je zanemarljiv v primeru uporabe tehnike PZV oziroma PZP, medtem ko je pri tehniki PCK in PPK minimalen.



Slika 5.3: Primerjava povprečnega časa vožnje IV pri različnih vrednostih območja prevzema v primeru najmanjše in največje gostote prometa. Izpis odstotkov v oziroma nad posameznimi stolpci izraža izboljšanje povprečnega časa vožnje IV v primerjavi s povprečnim časom vožnje IV brez uporabe tehnik prevzema pri ustrezni gostoti prometa.

5.3.2 Povprečna hitrost intervencijskega vozila

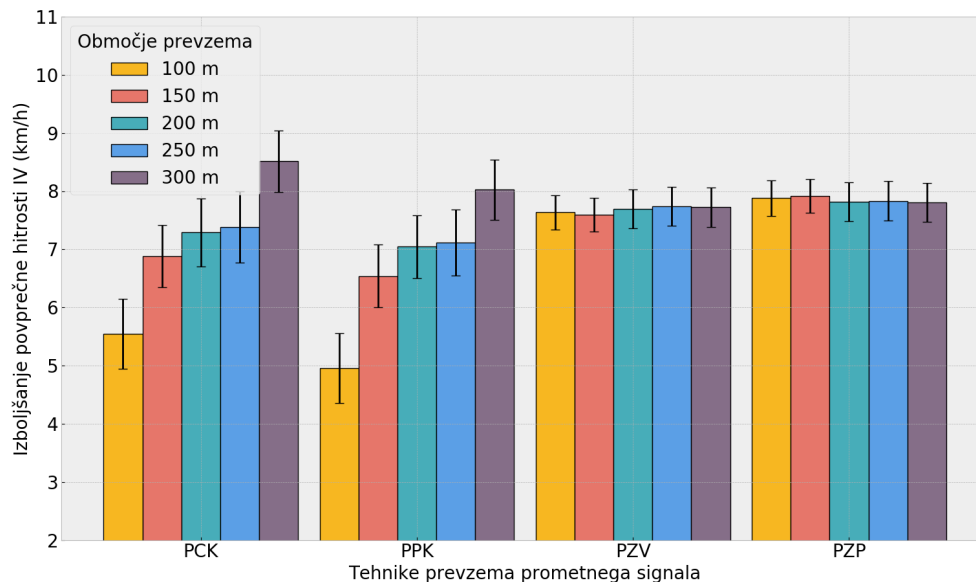
Če primerjamo povprečno hitrost intervencijskega vozila na sliki 5.4, lahko ponovno opazimo, da ima vrednost območja prevzema največji vpliv ravno pri tehniki prevzema celotnega križišča in prevzema poti v križišču. Pri vrednosti območja prevzema 300 je povprečna hitrost vozila z uporabo tehnike PCK oziroma PPK primerljiva tehniki PZV in PZP, vendar s pomembno razliko, ki jo izraža interval zaupanja na vrhu posameznega stolpca. To pomeni, da povprečna hitrost vozila pri uporabi tehnik PCK in PPK bolj variira kot pri tehnikah PZV in PZP.



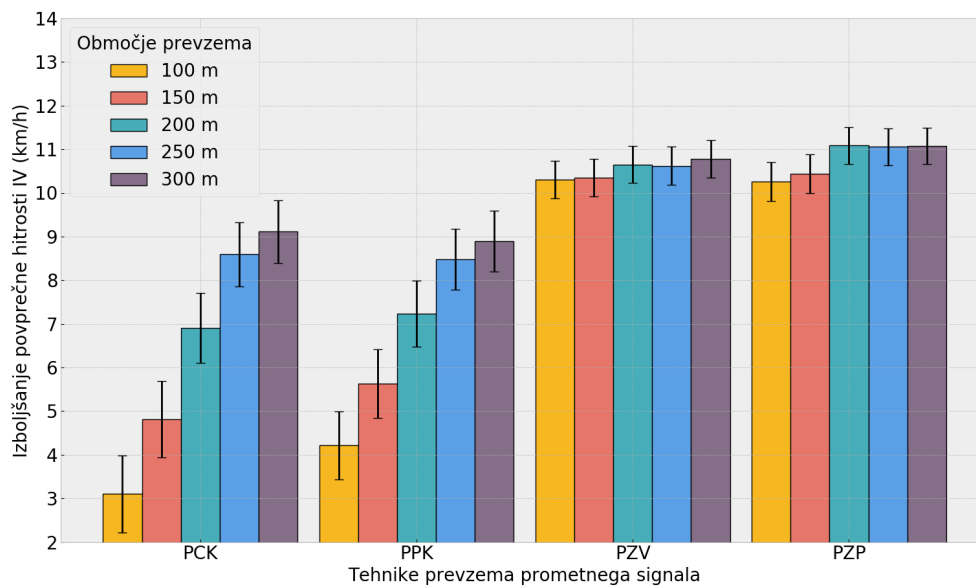
Slika 5.4: Povprečna hitrost intervencijskega vozila ne glede na pot in gostoto prometa na cesti.

Grafa na sliki 5.5 prikazujeta izboljšanje povprečne hitrosti intervencijskega vozila pri različnih gostotah cestnega prometa z uporabo posamezne tehnike prevzema v primerjavi z IV brez uporabe tehnik prevzema. Povprečna hitrost vozila upada z večanjem gostote prometa, hkrati pa se povečuje izboljšanje povprečne hitrosti vozila pri vseh tehnikah prevzema v primerjavi s povprečno hitrostjo vozila brez uporabe tehnik. V primeru večjega prometnega povpraševanja je izrazit tudi vpliv vrednosti območja prevzema pri tehniki PCK in PPK. V primeru najmanjšega prometnega povpraševanja je razlika izboljšanja povprečne hitrosti vozila med vrednostjo območja prevzema 100 in 300 2,97 km/h, medtem ko ta vrednost znaša 6,01 km/h v primeru največjega prometnega povpraševanja.

S primerjavo izboljšanja povprečne hitrosti intervencijskega vozila, ki uporablja oziroma ne uporablja tehnike prevzema prometnega signala, smo odkrili, pri kateri vrednosti območja prevzema se prične povprečna hitrost vozila povečevati z gostoto prometa na cesti. To se zgodi pri vrednosti 250 metrov, kar lahko odčitamo tudi na tabeli 5.3. V primeru tehnike prevzema poti v križišču se trend spremembe povečanja povprečne hitrosti glede na gostoto prometa prične spreminjati v pozi-



(a) Najmanjše prometno povpraševanje.



(b) Največje prometno povpraševanje.

Slika 5.5: Izboljšava povprečne hitrosti IV z uporabo posamezne tehnike prevzema prometnega signala v primerjavi s povprečno hitrostjo IV brez uporabe tehnik prevzema pri različnih vrednostih območja prevzema in gostote prometa.

tivno smer že pri vrednosti razdalje 200 metrov.

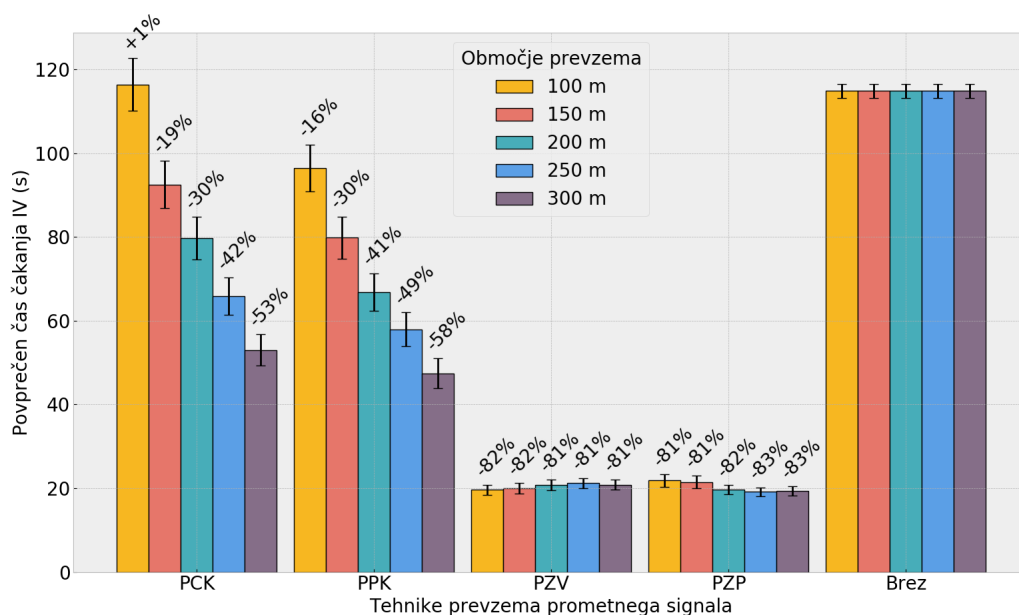
Območje prevzema	Gostota prometa	Tehnike prevzema prometnega signala			
		PCK	PPK	PZV	PZP
100 m	560	+5,54 km/h	+4,96 km/h	+7,64 km/h	+7,88 km/h
	700	+5,11 km/h	+5,06 km/h	+9,35 km/h	+9,26 km/h
	840	+3,68 km/h	+4,50 km/h	+10,13 km/h	+10,25 km/h
	1.050	+3,10 km/h	+4,21 km/h	+10,30 km/h	+10,26 km/h
150 m	560	+6,88 km/h	+6,54 km/h	+7,60 km/h	+7,92 km/h
	700	+6,33 km/h	+6,08 km/h	+9,35 km/h	+9,37 km/h
	840	+6,11 km/h	+6,43 km/h	+10,00 km/h	+10,15 km/h
	1.050	+4,81 km/h	+5,63 km/h	+10,35 km/h	+10,44 km/h
200 m	560	+7,29 km/h	+7,04 km/h	+7,69 km/h	+7,82 km/h
	700	+7,34 km/h	+7,34 km/h	+9,39 km/h	+9,58 km/h
	840	+7,17 km/h	+7,64 km/h	+10,37 km/h	+10,57 km/h
	1.050	+6,90 km/h	+7,23 km/h	+10,65 km/h	+11,09 km/h
250 m	560	+7,38 km/h	+7,12 km/h	+7,74 km/h	+7,83 km/h
	700	+8,20 km/h	+7,64 km/h	+9,29 km/h	+9,65 km/h
	840	+8,27 km/h	+7,89 km/h	+10,20 km/h	+10,64 km/h
	1.050	+8,60 km/h	+8,48 km/h	+10,62 km/h	+11,05 km/h
300 m	560	+8,51 km/h	+8,02 km/h	+7,72 km/h	+7,81 km/h
	700	+9,23 km/h	+8,80 km/h	+9,27 km/h	+9,62 km/h
	840	+8,92 km/h	+8,78 km/h	+10,34 km/h	+10,61 km/h
	1.050	+9,11 km/h	+8,89 km/h	+10,78 km/h	+11,07 km/h

Tabela 5.3: Tabela prikazuje izboljšanje povprečne hitrosti intervencijskega vozila v primerjavi z oziroma brez uporabe tehnik prevzema prometnega signala pri različnih vrednostih območja prevzema in gostotah prometa (maksimalno število aktivnih vozil v posameznem koraku simulacije).

5.3.3 Povprečni čas čakanja intervencijskega vozila

Tekom vožnje se intervencijsko vozilo lahko tudi zaustavi v primeru nastale kolone vozil, ki jih ne more prehiteti. Pričakovano je, da bo intervencijsko vozilo tekom izvajanja nujne vožnje brez uporabe tehnik prevzema v povprečju dlje časa mirovalo v primerjavi z vozilom, ki uporablja tehnike prevzema signala. Potrditev

teze prikazuje graf na sliki 5.6, iz katerega lahko razberemo, da tehniki prevzema z zelenim valom in prevzema z zelenim valom na celotni poti znatno pripomoreta k minimiziranju časa mirovanja intervencijskega vozila na nujni vožnji. Če primerjamo vrednosti intervala zaupanja v obliki navpične črte na vrhu stolpcev, lahko opazimo, da čas čakanja intervencijskega vozila z uporabo tehnike PZV in PZP bolj konvergira kot pri tehnikah PCK in PPK.



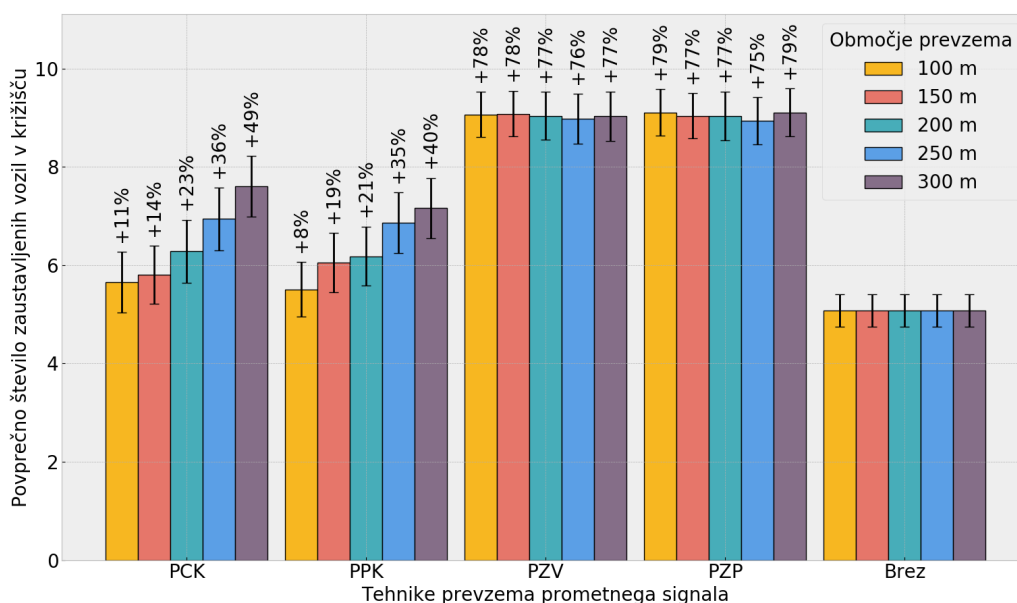
Slika 5.6: Povprečni čas čakanja intervencijskega vozila pri različnih vrednostih območja prevzema v primeru povprečne prometne obremenitve.

5.3.4 Povprečno število mirujočih vozil v križiščih

Zadnja izmed obravnavanih meritev je povprečno število mirujočih vozil na vhodnih voznih pasovih križišča, ko intervencijsko vozilo zapusti križišče. S to meritvijo želimo oceniti, koliko posamezna tehnika prevzema prometnega signala pri določeni vrednosti območja prevzema vpliva na daljšanje kolon vozil v križiščih. Podatke o številu mirujočih vozil, to so vozila, katerih hitrost vožnje ne presega 0,1 m/s, smo beležili za vsa križišča na poti intervencijskega vozila. Ob izhodu IV iz semaforiziranega križišča smo za naslednjih 5 sekund beležili število mirujočih vo-

5.3. PRIMERJAVA VREDNOSTI OBMOČJA PREVZEMA (FAZA 1) 57

zil na vseh vhodnih pasovih križišča. Časovni interval beleženja mora biti kratek, saj želimo ugotoviti, koliko posamezna tehnika vpliva na zgoščevanja prometa v križiščih tekom izvedbe prevzema prometnega signala. Pri obravnavi meritev smo za določeno pot izračunali povprečno število mirujočih vozil za 10 križišč, ki so bila najbolj obremenjena na posamezni poti. Število obravnavanih križišč na poti intervencijskega vozila smo omejili na vrednost 10, saj negativni vpliv tehnik prevzema najbolj pride do izraza pri prometno bolj obremenjenih semaforiziranih križiščih. Rezultati meritev so predstavljeni na grafu slike 5.7, ki nazorno ponazarja negativni vpliv tehnik prevzema prometnega signala. Na pretok vozil najslabše vplivata tehniki PZV ter PZP, in to neglede na vrednost območja prevzema. Tehniki PCK in PPK tudi negativno vplivata na pretok vozil znotraj cestnega omrežja, vendar je njihov vpliv pogojen z vrednostjo območja prevzema, čim večja je vrednost tem slabši je vpliv na pretok vozil.



Slika 5.7: Povprečno število mirujočih vozil pri različnih vrednostih območja prevzema za 10 najbolj obremenjenih semaforiziranih križišč posamezne poti pri povprečnem prometnem povpraševanju.

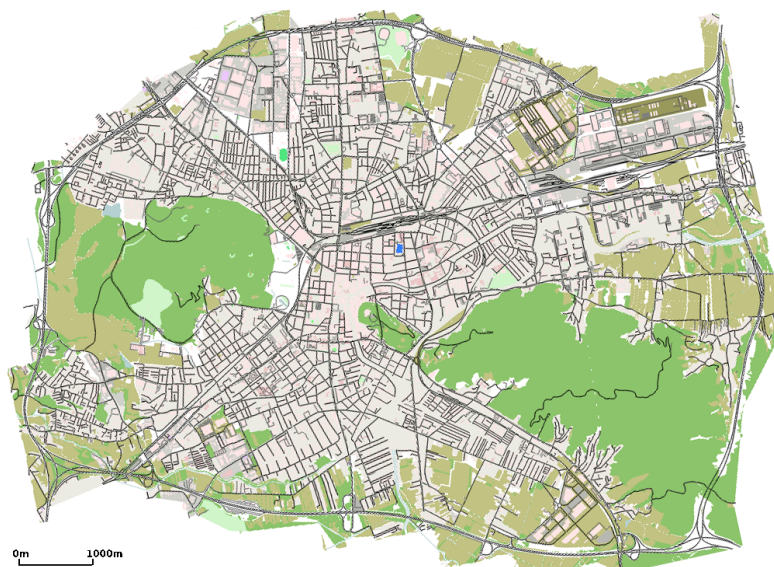
5.3.5 Izbira optimalne vrednosti območja prevzema

Glede na izluščene podatke pridobljenih meritev tekom testiranja želimo določiti vrednost območja prevzema, pri kateri tehnike dosegajo optimalne rezultate in njihov vpliv na pretok vozil ni preveč negativen. Kot smo že predhodno omenili, ima vrednost območja prevzema največji vpliv na uspešnost tehnik prevzema celotnega križišča in prevzema poti v križišču. S tem v mislih in glede na vse meritve menimo, da ti dve tehniki najbolje opravljata svojo nalogo pri uporabljeni vrednosti območja prevzema 200 oziroma 250 metrov. Pri tem se moramo zavedati, da je cilj tehnik PCK in PPK izvesti prevzem prometnega signala, ko je intervencijsko vozilo čim bližje semaforiziranemu križišču. S povečevanjem razdalje, znotraj katere lahko vozilo pošlje zahtevek, tovrstna tehnika slabo učinkuje na pretok vozil v cestnem omrežju in je v takšnem primeru bolj smiselno uporabiti drugačne tehnike, kot je na primer tehnika prevzema z zelenim valom.

5.4 Testiranje uspešnosti tehnik v večjem obsegu (faza 2)

V prejšnji fazi testiranja smo obravnavali rezultate tehnik prevzema prometnega signala na manjšem obsegu cestnega omrežja Ljubljane z namenom pridobitve povratnih informacij glede uspešnosti tehnik PCK in PPK pri različnih vrednostih območja prevzema. Pri testiranju tehnik v večjem obsegu smo upoštevali iztočnice prejšnjega testiranja in smo izvajali simulacije le z uporabo območja prevzema z vrednostjo 200 in 250 metrov. Testiranje smo izvedli na večjem območju cestnega omrežja Ljubljane, slika 5.8, ki je vsebovalo 301 semaforizirano križišče in 1.282 km cest, ki so skupaj vsebovale 1.489 km voznih pasov. Tehnike smo za razliko od prejšnjega testiranja preizkušali na 20 različnih poteh, katerih podrobnosti so navedene v tabeli 5.4. Tabela vključuje tudi podatke o času vožnje in povprečni hitrosti celotne poti, ki smo jih izračunali ob predpostavki, da intervencijsko vozilo posamezno pot prevozi z najvišjo dovoljeno hitrostjo v posameznem odseku poti.

Testiranje v večjem obsegu vključuje 48.000 simulacij, kar pomeni, da smo opravili 2.400 simulacij za posamezno pot, od tega 480 za posamezno tehniko prevzema prometnega signala. Če to vrednost delimo še s številom različnih go-



Slika 5.8: Cestno omrežje Ljubljane, ki je bilo uporabljeno pri testiranju tehnik v večjem obsegu.

stot prometa (4) in številom različnih vrednosti območja prevzema (2), lahko izračunamo, da smo za posamezno kombinacijo poti, tehnike prevzema, gostote prometa in vrednosti območja prevzema izvedli 60 simulacij. Zaradi dolgega izvajanja posamezne simulacije smo se morali omejiti na manjše število simulacij, saj izvedba ene simulacije v primeru paralelnega izvajanja traja 40 sekund. Celotno testiranje je po tem izračunu trajalo približno dobrih 22 dni.

Cilj testiranja je ugotoviti, koliko časa intervencijsko vozilo v povprečju prihrani z uporabo posamezne tehnike prevzema prometnega signala. Prav tako nas zanima, kolikšen je vpliv posamezne tehnike na pretočnost vozil v cestnem omrežju. Nazadnje bomo odčitali še razliko v sproščanju prometa skozi semaforizirano križišče, ko ga zapusti intervencijsko vozilo, pri dveh različnih tehnikah ponastavitve prometnega signala.

	Pot 1	Pot 2	Pot 3	Pot 4	Pot 5	Pot 6	Pot 7	Pot 8	Pot 9	Pot 10
Število semaforiziranih križišč	22	12	25	7	22	18	36	41	33	22
Dolžina poti	8.986 m	5.110 m	6.704 m	2.720 m	8.599 m	10.624 m	11.435 m	14.587 m	9.818 m	7.953 m
Čas vožnje ^a	648 s	369 s	491 s	194 s	609 s	798 s	865 s	1.055 s	707 s	599 s
Povprečna hitrost celotne poti ^a	49,9 km/h	49,8 km/h	49,0 km/h	50,4 km/h	50,8 km/h	47,9 km/h	47,6 km/h	49,8 km/h	49,9 km/h	47,8 km/h

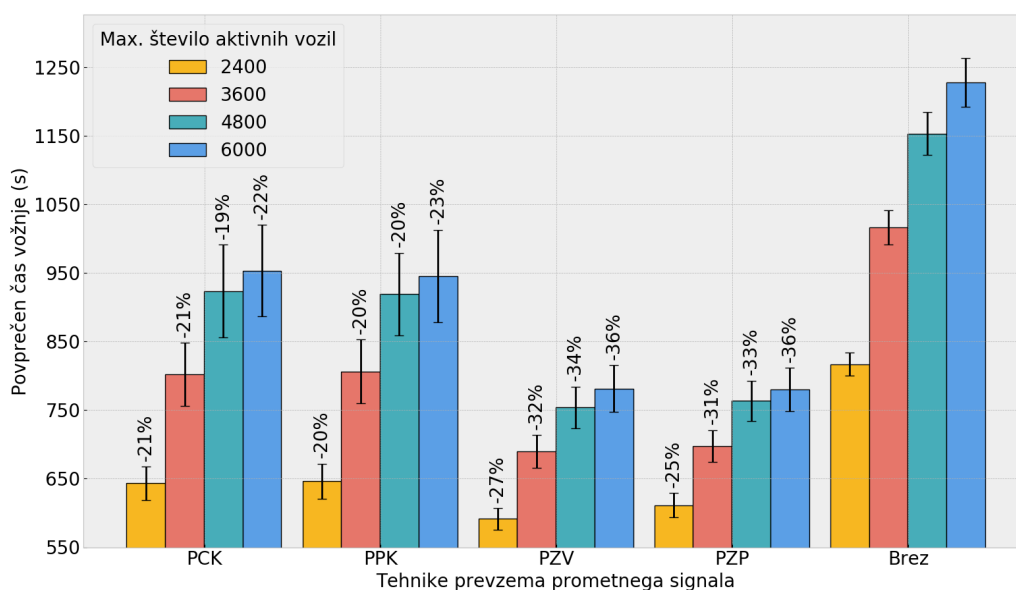
	Pot 11	Pot 12	Pot 13	Pot 14	Pot 15	Pot 16	Pot 17	Pot 18	Pot 19	Pot 20
Število semaforiziranih križišč	21	23	27	32	9	37	15	24	23	31
Dolžina poti	8.338 m	11.856 m	15.905 m	6.378 m	4.476 m	13.515 m	12.934 m	10.568 m	11.779 m	14.395 m
Čas vožnje ^a	534 s	820 s	1.104 s	433 s	370 s	884 s	954 s	514 s	641 s	1.069 s
Povprečna hitrost celotne poti ^a	56,1 km/h	52,0 km/h	51,8 km/h	52,9 km/h	43,5 km/h	54,9 km/h	48,7 km/h	73,9 km/h	66,0 km/h	48,4 km/h

Tabela 5.4: Podatki o poteh, na katerih smo preizkušali različne tehnike prevzema prometnega signala.

^aIzračunani podatki

5.4.1 Povprečni čas vožnje intervencijskega vozila

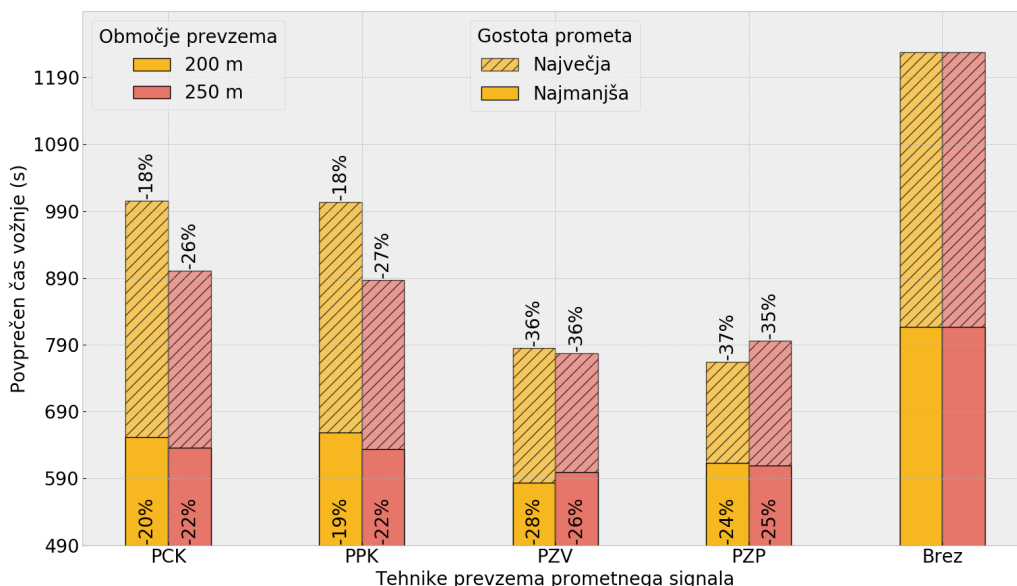
Pri prejšnjem testiranju smo že ugotovili, da tehnike prevzema prometnega signala znatno pripomorejo k izboljšanju časa vožnje intervencijskega vozila, neglede na gostoto prometa. Testiranje v večjem obsegu to dejstvo ne samo potrdi, ampak tudi okrepi s še boljšimi rezultati, ki so prikazani na grafu slike 5.9. Na grafu predvsem izstopa uspešnost tehnike prevzema z zelenim valom (PZV) in tehnike prevzema z zelenim valom na celotni poti (PZP), saj v najboljšem primeru pripomoreta celo k 36% izboljšanju časa vožnje v primerjavi z intervencijskim vozilom brez uporabe tehnike prevzema. Pri tehnikah prevzema celotnega križišča (PCK) in prevzema poti v križišču (PPK) izstopa tudi podatek o razponu vrednosti povprečnega časa vožnje s 95% gotovostjo v primerjavi s tehniko PZV oziroma PZP. Največji razpon ti dve tehniki dosežeta ravno pri največjem prometnem povpraševanju.



Slika 5.9: Povprečni čas vožnje intervencijskega vozila neglede na vrednost območja prevzema. Na vrhu stolpcev je navedeno izboljšanje časa vožnje v primerjavi s povprečnim časom vožnje IV brez uporabe tehnike prevzema, med tem ko navpična črta na vrhu stolpcev predstavlja 95% interval zaupanja posamezne vrednosti stolpca.

Primerjava povprečnega časa vožnje intervencijskega vozila glede na vrednost

območja prevzema razkrije, da sta tehniki PCK in PPK veliko bolj učinkoviti pri uporabljeni vrednosti 250 metrov, predvsem v primeru največjega prometnega povpraševanja. Podatki celotne primerjave so prikazani na grafu slike 5.10.

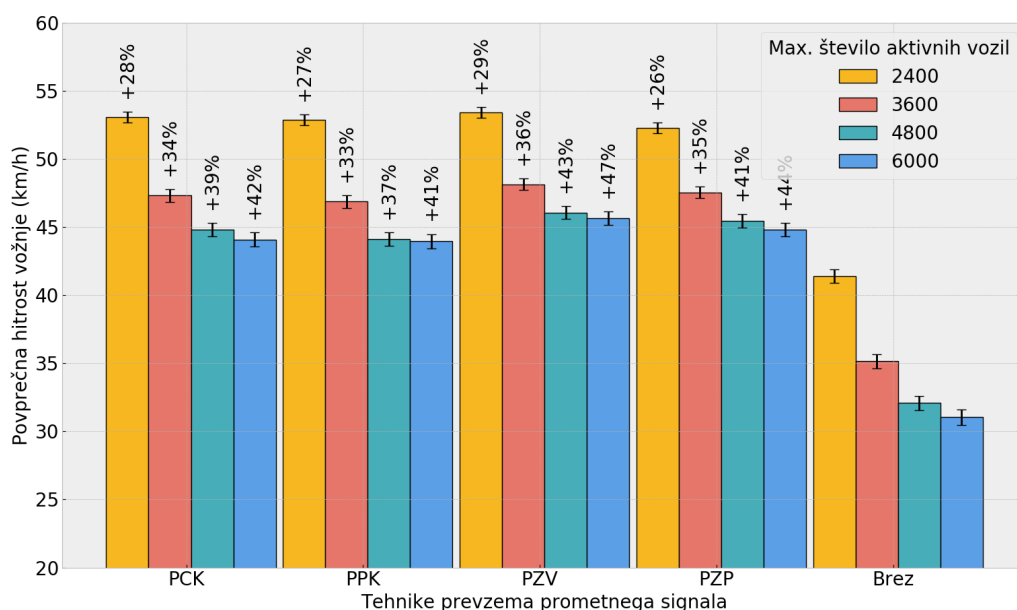


Slika 5.10: Povprečni čas vožnje IV pri različnih vrednostih območja prevzema v primeru najmanjšega oziroma največjega prometnega povpraševanja. Na dnu in na vrhu stolpcev je navedeno izboljšanje časa vožnje IV pri različnih gostotah prometa v primerjavi z IV brez uporabe tehnike prevzema.

5.4.2 Povprečna hitrost intervencijskega vozila

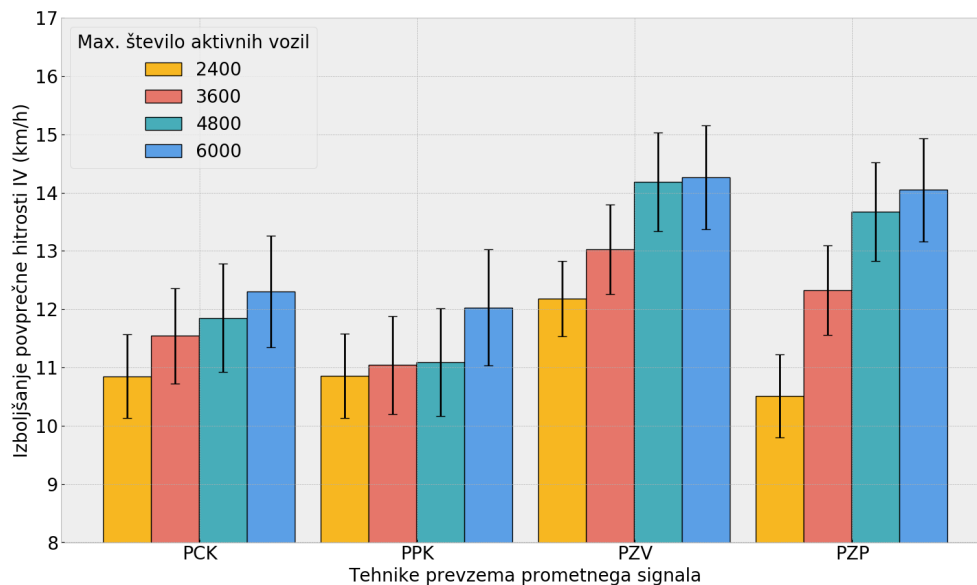
Največjo povprečno hitrost vožnje intervencijska vozila dosegajo z uporabo tehnike PZV oziroma s tehniko PZP. Razlike povprečnih hitrosti so med posameznimi tehnikami prevzema minimalne in si jih lahko ogledamo na grafu slike 5.11. Povprečna hitrost vožnje z uporabo tehnike PZV je v vseh primerih gostote prometa višja v primerjavi z vrednostmi, ki jih je intervencijsko vozilo doseglo z uporabo tehnike PZP. Glede na rezultate prvega testiranja so nas takšni rezultati presenetili, vendar se moramo na tem mestu zavedati, da je PZP težje uspešno izvedljiva in lahko se pripetijo primeri, ko mora intervencijsko vozilo pri posameznem križišču naknadno izvesti prevzem poti v križišču, saj prevzem z zelenim valom na celotni poti

ni bil uspešen. V takšnih situacijah mora intervencijsko vozilo upočasniti vožnjo in ponovno poslati zahtevek za prevzem signala in šele nato lahko prosto in hitro nadaljuje z vožnjo.

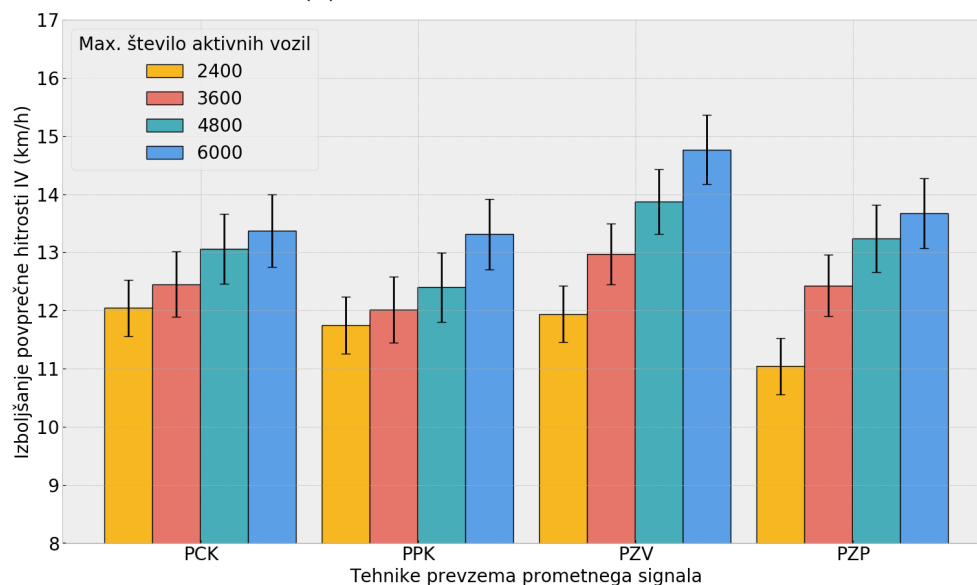


Slika 5.11: Povprečna hitrost IV pri različnih gostotah prometa. Vrednost v odstotkih na vrhu stolpcev predstavlja izboljšanje povprečne hitrosti vožnje v primerjavi z vožnjo IV brez uporabe tehnike prevzema. Navpična črta na vrhu stolpcev predstavlja 95% interval zaupanja vrednosti povprečne hitrosti vozila.

Na grafu prejšnje slike 5.11 je očiten tudi padec povprečne hitrosti intervencijskega vozila z večanjem gostote prometa na cesti. To velja tako za povprečno hitrost vožnje intervencijskega vozila brez uporabe tehnik kot tudi za vozilo, ki uporablja tehnike prevzema prometnega signala. Na sliki 5.12 prikazuje zgornji graf trend naraščanja razlike v povprečni hitrosti vozila z uporabo posamezne tehnike v primerjavi z IV, ki ne uporablja tehnik prevzema. Na tem grafu so predstavljeni rezultati tehnik, kjer smo uporabili vrednost 200 metrov za območje prevzema. Rezultati primerjave izboljšanja povprečne hitrosti vozila pri tehnikah z uporabo vrednosti območja prevzema 250 metrov na spodnjem grafu slike 5.12 prikazujejo še večje razlike.



(a) Območje prevzema: 200 m.

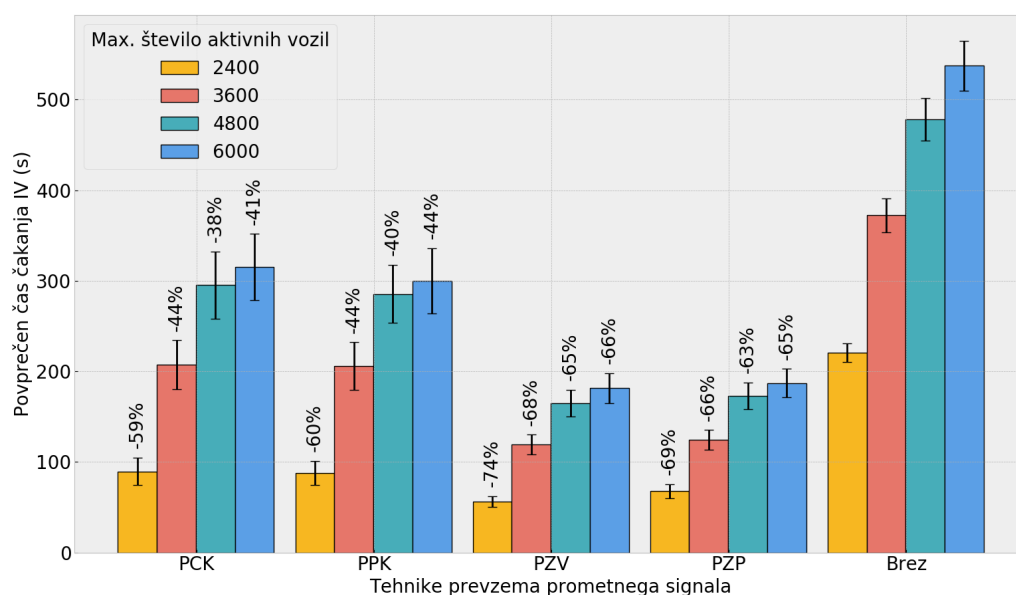


(b) Območje prevzema: 250 m.

Slika 5.12: Izboljšava povprečne hitrosti IV z uporabo posamezne tehnike prevzema prometnega signala v primerjavi s povprečno hitrostjo IV brez uporabe tehnik prevzema pri različnih vrednostih območja prevzema in gostote prometa.

5.4.3 Povprečni čas čakanja intervencijskega vozila

Intervencijsko vozilo na nujni vožnji v primeru nezmožnosti prehitovanja vozil pred seboj lahko tudi obstoji v prometu in mora počakati, da se prične promet pred njim sproščati. Takšne situacije se pogosteje pojavljajo ob večjem prometnem povpraševanju, kot je na primer jutranja oziroma popoldanska prometna konica. Tehnike prevzema prometnega signala v takšnih situacijah znatno pripomorejo k minimiziranju časa čakanja, kar lahko razberemo tudi iz grafa slike 5.13. V tem pogledu predvsem izstopajo rezultati tehnike prevzema z zelenim valom, saj so v primerjavi z ostalimi tehnikami pri vseh različnih gostotah prometa najboljše.

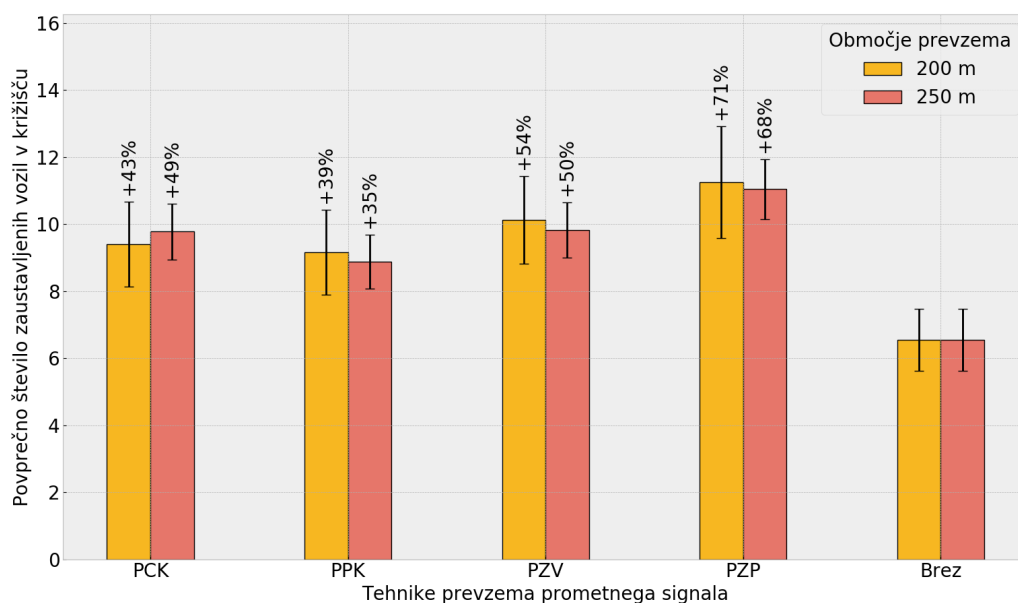


Slika 5.13: Povprečni čas čakanja intervencijskega vozila pri različnih gostotah prometa na cesti.

5.4.4 Povprečno število mirujočih vozil v križiščih

Ob izvajanju posamezne simulacije smo zbirali tudi podatke o številu mirujočih vozil na vhodnih pasovih semaforiziranih križišč v času, ko intervencijsko vozilo zapusti križišče. S pomočjo tovrstnih metrik lahko analiziramo negativni vpliv tehnik prevzema, tj. daljšanje kolon vozil v križišču tekom izvedbe tehnike pre-

vzema prometnega signala. Vizualizacija meritev mirujočih vozil v križiščih na intervalu petih sekund po izhodu intervencijskega vozila iz križišča je podana na grafu slike 5.14. Pri analizi smo obravnavali le podatke za prvih pet sekund, saj se kasneje število mirujočih vozil prične zmanjševati zaradi ponastavitve prometnega signala. Na tem mestu je potrebno navesti, da smo ponovno analizirali meritve 10 najbolj prometno obremenjenih semaforiziranih križišč na posamezni poti, saj se izkaže, da je negativni vpliv tehnik prevzema najbolj očiten v primeru bolj obremenjenih križišč. V tem aspektu se najslabše izkaže tehnika prevzema z zelenim valom na celotni poti, medtem ko najmanj vpliva na pretočnost vozil tehnika prevzema poti v križišču. Takšni rezultati so bili povsem pričakovani, saj sta bili ti dve tehniki že v teoriji najslabša oziroma najboljša tehnika v tem aspektu.



Slika 5.14: Povprečno število mirujočih vozil na vhodnih pasovih semaforiziranih križišč v času 5 sekund po izhodu IV iz križišča. Graf vključuje podatke vseh različnih gostot prometa.

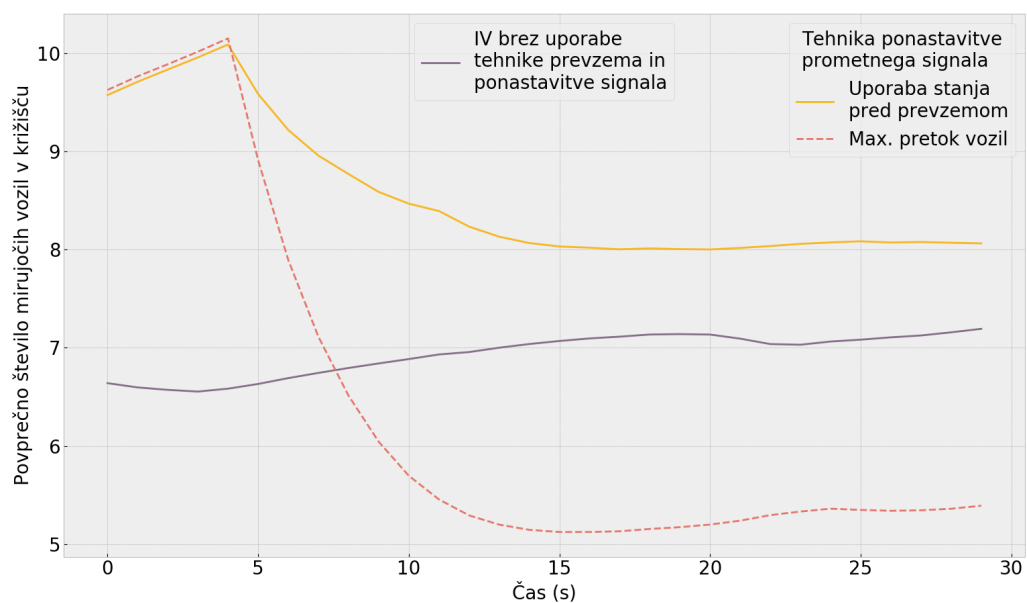
5.4.5 Primerjava uspešnosti tehnik ponastavitve prometnega signala

Zadnja izmed obravnavanih meritev druge faze testiranja je število mirujočih vozil na vhodnih pasovih semaforiziranih križišč v času 30 sekund po izhodu intervencijskega vozila iz križišča. S pomočjo zbranih podatkov smo analizirali uspešnost tehnik ponastavitve prometnega signala, ki jo izvede kontrolni center cestnega prometa ob izhodu intervencijskega vozila iz križišča. V razdelku 4.5 sta opisani dve implementirani tehniki ponastavitve prometnega signala, in sicer: ponastavitev faze semaforja na stanje pred izvedbo prevzema prometnega signala s strani IV in ponastavitev faze semaforja na stanje, ki omogoča največji pretok vozil skozi križišče. Pri analizi smo obravnavali le podatke 10 najbolj obremenjenih križišč na posamezni poti v sklopu druge faze testiranja, ker je razlika med omenjenima teknikama najbolj opazna ravno pri bolj obremenjenih semaforiziranih križiščih. Vizualizacija izluščenih podatkov je prikazana na sliki 5.15, kjer lahko opazimo očitno razliko med omenjenima teknikama ponastavitve prometnega signala v smislu omogočanja največje pretočnosti prometa skozi križišče. Graf vključuje tudi podatke o povprečnem številu mirujočih vozil križišča v primeru vožnje intervencijskega vozila skozi križišče brez uporabe tehnik prevzema in ponastavitve prometnega signala.

5.5 Sklepne ugotovitve testiranja

V tem razdelku sledi razprava o sklepnih ugotovitvah iz obeh faz testiranja. Cilj prve faze je bil na podlagi simulacij ugotoviti optimalno vrednost območja prevzema, kjer smo ugotovili, da sta to kar dve vrednosti, in sicer 200 ter 250 metrov. Rezultate prve faze, kjer upoštevamo le simulacije s prej omenjenima vrednostma območja prevzema, lahko primerjamo z rezultati druge faze testiranja z namenom ugotovitve prispevka tehnik prevzema prometnega signala pri različnih velikostih cestnega omrežja. Na ta način lahko ugotovimo, katero izmed tehnik prevzema in v kolikšnem obsegu je najbolj primerno uporabiti v cestnem omrežju Ljubljane.

V prvi fazi testiranja znaša povprečna dolžina poti, na katerih smo preizkušali tehnike prevzema, 7.082 km. Posamezna pot v povprečju vsebuje 20 semaforizira-



Slika 5.15: Povprečno število mirujočih vozil na vhodnih pasovih semaforiziranih križišč po izhodu IV iz križišča pri izvedbi različnih tehnik ponastavitve prometnega signala. Graf vključuje podatke vseh različnih gostot prometa.

nih križišč. V drugi fazi testiranja je povprečna dolžina vseh poti nekoliko daljša in znaša 9.834 km. Prav tako v povprečju posamezna pot vsebuje več semaforiziranih križišč kot v prvi fazi testiranja, in sicer 24. Doprinos tehnik prevzema prometnega signala na manjšem oziroma večjem delu cestnega omrežja Ljubljane podaja tabela 5.5, ki vključuje tudi podatke o povprečnem izboljšanju časa vožnje intervencijskega vozila pri uporabi posamezne tehnike prometnega signala v primerjavi s povprečnim časom vožnje intervencijskega vozila brez uporabe tehnik prevzema. Naveden je tudi izračunani podatek o povprečnem pridobljenem času v sekundah na kilometer poti, kjer smo upoštevali prej navedeno povprečno dolžino vseh poti posamezne faze testiranja.

Faza testiranja	Prva ^a		Druga ^b	
	Povp. izboljšanje časa vožnje ^c	Izboljšanje časa vožnje na km poti ^c	Povp. izboljšanje časa vožnje ^c	Izboljšanje časa vožnje na km poti ^c
Tehnike prevzema prometnega signala				
PCK	121 s	17,16 s/km	230 s	23,46 s/km
PPK	117 s	16,53 s/km	233 s	23,79 s/km
PZV	130 s	18,38 s/km	344 s	35,01 s/km
PZP	132 s	18,76 s/km	333 s	33,90 s/km

^aPoti v prvi fazi testiranja vključujejo povprečno 20 semaforiziranih križišč in so dolge v povprečju 7.084 km.

^bPoti v drugi fazi testiranja vključujejo povprečno 24 semaforiziranih križišč in so dolge v povprečju 9.834 km.

^cV primerjavi s povprečnim časom vožnje intervencijskega vozila brez uporabe tehnike prevzema prometnega signala.

Tabela 5.5: Doprinos tehnik prevzema prometnega signala pri različno velikih območjih cestnega omrežja Ljubljane.

Pri izbiri sistema za prevzem prometnega signala s strani intervencijskih vozil, ki bi ga želeli uporabiti v določenem cestnem omrežju, je bistvenega pomena, da se

odločimo za takšnega, ki ponuja največji prihranek na času izvedbe nujne vožnje. Negativne posledice obravnavanih sistemov so minornega pomena, vendar jih je treba prav tako upoštevati. Glede na navedena kriterija bi za območje celotnega cestnega omrežja Ljubljane predlagali uporabo tehnike prevzema z zelenim valom (PZV) v kombinaciji s tehniko ponastavitve prometnega signala z omogočanjem maksimalnega pretoka vozil. Tovrstna kombinacija, glede na navedene rezultate v prejšnjih razdelkih, ponuja največji prispevek k prihranku časa vožnje intervencijskega vozila in hkrati s pomočjo tehnike ponastavitve prometnega signala odlično odpravlja negativne posledice tehnike prevzema.

Izbira tehnike PZV namesto PZP je bila storjena na podlagi statistične primerjave povprečnega časa vožnje intervencijskega vozila z uporabo posamezne tehnike. Statistična analiza je vključevala vse pridobljene rezultate o času vožnje intervencijskega vozila, neglede na gostoto prometa, območje prevzema in poti. Mediana časa vožnje IV z uporabo tehnike PZV znaša 703,19 sekunde, medtem ko pri tehniki PZP znaša 714,13 sekund. Obravnavani vzorec je bil pri tehniki PZV velikosti 10544, pri tehniki PZP pa 10516. Uporaba Mann-Whitney U testa je pokazala, da je povprečni čas vožnje intervencijskega vozila z uporabo tehnike PZP večji, kot pri uporabi tehnike PZV; $U = 54142546$, $p = 0,00163$ [25].

Na tem mestu se je treba zavedati, da implementacija takšne kombinacije tehnik zahteva velik poseg v cestnoprometno infrastrukturo. Na vsakem semaforiziranem križišču bi bilo potrebno namestiti strojno opremo za zaznavanje prihajajočih intervencijskih vozil in posebno kontrolno enoto, preko katere bi križišče komuniciralo s kontrolnim centrom cestnega prometa. Uporaba tehnike ponastavitve prometnega signala zahteva uporabo namenske strojne opreme za merjenje dolžine kolon vozil na vhodnih pasovih križišča. Poleg strojne opreme potrebujemo tudi programsko opremo za namene komunikacije in upravljanja semaforjev.

Kot alternativno izbiro pri umestitvi sistema za prevzem prometnega signala v cestno omrežje Ljubljane predlagamo tehniko za prevzem celotnega križišča (PCK), ki ponuja dobre rezultate v prihranku časa intervencijskih vozil na nujni vožnji in zahteva znatno manjši poseg v infrastrukturo cestnega omrežja. V posamezno semaforizirano križišče je potrebno namestiti le strojno opremo za zaznavanje intervencijskih vozil in namenski krmilnik za upravljanje signala semaforjev. Hkrati je slednja tehnika tudi intuitivna za uporabo pri udeležencih cestnega pro-

meta v primerjavi s tehniko prevzema poti v križišču.

Poglavje 6

Zaključek

V okviru magistrskega dela smo na podlagi podrobno raziskanega področja tehnik prevzema prometnega signala s strani intervencijskih vozil izdelali simulator cestnega prometa za namen ocenjevanja in analiziranja uspešnosti tehnik prevzema. S pomočjo simulatorja smo v dveh korakih testiranja ovrednotili prispevek tehnik prevzema prometnega signala na cestnem omrežju Ljubljane. Implementacija simulatorja se nahaja v GitHubu [kosenina/EVPS](https://github.com/kosenina/EVPS)¹.

Ugotovili smo, da vse štiri tehnike znatno pripomorejo k izboljšanju časa nujne vožnje v primerjavi s trenutno uporabljeno tehnologijo intervencijskih vozil v Ljubljani, tj. uporaba svetlobnih in zvočnih signalov. Najbolje se izkaže tehnika prevzema z zelenim valom (PZV), kjer v povprečju dosežemo 32% krajši čas vožnje v primerjavi s povprečnim časom vožnje IV brez uporabe tehnik prevzema. Ti rezultati so primerljivi z dosežki enakovrednih oziroma zelo podobnih tehnik prevzema v sorodnih raziskavah [1, 26]. Ugotovili smo tudi, da tehnika PZV doseže 12% izboljšanje časa vožnje intervencijskega vozila v primerjavi s tradicionalno tehniko prevzema celotnega križišča (PCK). Ta ocenitev je prav tako primerljiva s študijo, kjer primerjajo prispevek tradicionalne tehnike prevzema s tehniko zelenega vala na podlagi aktualnih razmer v cestnem prometu [27].

Uspešnosti tehnik nismo ocenjevali le z analiziranjem povprečnega časa vožnje, ampak smo pri tem upoštevali tudi podatke o povprečni hitrosti intervencijskega vozila in povprečnem času čakanja tekom celotne poti. Tehnike prevzema pro-

¹Dostopno na: <https://github.com/kosenina/EVPS>

metnega signala so zelo učinkovite pri zmanjševanju časa vožnje intervencijskega vozila, vendar imajo tudi slabosti. Najbolj pomembna težava je, da negativno vplivajo na običajne prometne tokove, zlasti v času prometnih konic. Negativni prispevek smo ocenjevali z meritvami števila mirujočih vozil na vhodnih pasovih semaforiziranih križišč v času izvedbe prevzema prometnega signala s strani intervencijskega vozila. Ugotovili smo, da se v tem vidiku najslabše izkažeta tehniki prevzema z zelenim valom in prevzema z zelenim valom na celotni poti (PZP).

V drugi fazi testiranja smo v sklopu analiziranja rezultatov ocenjevali tudi prispevek dveh tehnik ponastavitve prometnega signala, katerih cilj je zmanjšati negativni vpliv tehnik prevzema na pretočnost vozil v cestnem omrežju. Pri tem smo ugotovili, da se tehnika, ki ponastavi signal semaforja na optimalno stanje faze, v smislu pretočnosti vozil skozi križišče, izkaže znatno bolje v primerjavi s tehniko ponastavitve prometnega signala na predhodno stanje.

V zaključku evalvacije tehnik prevzema v cestnem omrežju Ljubljane smo na podlagi vseh pridobljenih rezultatov izpostavili najboljšo tehniko prevzema oziroma ponastavitve prometnega signala, za katero menimo, da bi največ pripomogla k izboljšanju izvedbe intervencijskih storitev v cestnem omrežju Ljubljane.

Pri izvedbi evalvacije tehnik s pomočjo izdelanega simulatorja smo bili omejeni na določeno število ponovitev simulacij zaradi časovne kompleksnosti izvajanja celovitega testiranja, kot tudi stroškov uporabe računalnika v oblaku, kjer smo izvajali simulacije. Z uporabo zmogljivejšega računalnika v oblaku, bi lahko izvajali še več vzporednih simulacij hkrati. Na ta način bi tehnike prevzema prometnega signala lahko preizkušali pri dodatnih kombinacijah: poti, gostote prometa in območij prevzema, ter pridobili ustrezne podatke za vsesplošno oceno prispevka preizkušenih tehnik za podano cestno omrežje.

Testiranje in analizo tehnik prevzema na cestnem omrežju Ljubljane bi lahko izboljšali z uporabo realnih podatkov o fazah semaforjev, za katere v našem delu nismo prejeli pooblastila. Dodatna izboljšava, ki jo je vredno omeniti, bi bila uporaba realnih podatkov o pretoku vozil znotraj celotnega cestnega omrežja Ljubljane. Trenutno na tem območju še ni na voljo točnih podatkov o dnevnem pretoku vozil za posamezne ceste. Zadnja izmed možnosti za izboljšave, ki bi jo radi poudarili, je primerjava doprinosa tehnik prevzema prometnega signala z realnimi podatki, ki bi jih bilo potrebno zbrati ob izvedbi posamezne intervencijske

vožnje. Z vsemi omenjenimi izboljšavami bi lahko bolj natančno ocenili dejanski doprinos tehnik prevzema za posamezno cestno omrežje.

Literatura

- [1] V. Paruchuri, Adaptive preemption of traffic for emergency vehicles.
- [2] Podatki o prometnih obremenitvah s strani direkcije rs za infrastrukturo, (Dostopano: 12.1.2018).
URL http://www.di.gov.si/si/delovna_podrocja_in_podatki/ceste_in_promet/podatki_o_prometu
- [3] M. Smith, P. Davidson, H. Pfister, Emergency vehicle warning and traffic control system, uS Patent 4,775,865 (oct 1988).
URL <https://www.google.com/patents/US4775865>
- [4] W. Leonard, R. Leonard, Traffic light control apparatus for emergency vehicles, uS Patent 6,072,406 (jun 2000).
URL <https://www.google.com/patents/US6072406>
- [5] G. A. Gregori, Emitter assembly for use in an optical traffic preemption system, uS Patent 5,187,373 (feb 1993).
URL <https://www.google.com/patents/US5187373>
- [6] Y.-S. Weng, Y.-S. Huang, S.-F. Su, C.-S. Yu, Modelling of emergency vehicle preemption systems using statecharts, in: 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE, 2011, pp. 556–561. doi:10.1109/icsmc.2011.6083742.
URL <https://doi.org/10.1109/icsmc.2011.6083742>
- [7] A. S. Eltayeb, H. O. Almubarak, T. A. Attia, A GPS based traffic light pre-emption control system for emergency vehicles, in: 2013 International Conference on Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE),

- IEEE, 2013, pp. 724–729. doi:10.1109/icceee.2013.6634030.
URL <https://doi.org/10.1109/icceee.2013.6634030>
- [8] A. engineering council, Manual on street traffic signs, signals and markings, 1929.
- [9] J. Collura, J. Chang, E. W. Willhaus, J. Gifford, Traffic signal preemption and priority: Technologies, past deployments, and system requirements, in: ITS America 11th Annual Meeting and Exposition, ITS: Connecting the Americas, 2001.
- [10] K. Al-Khateeb, J. A. Y. Johari, Intelligent dynamic traffic light sequence using RFID, in: 2008 International Conference on Computer and Communication Engineering, IEEE, 2008, pp. 1367–1372. doi:10.1109/iccce.2008.4580829.
URL <https://doi.org/10.1109/iccce.2008.4580829>
- [11] J. F. Paniati, M. Amoni, Traffic signal preemption for emergency vehicle: a cross-cutting study, US Federal Highway Administration.
URL <https://books.google.si/books?id=DXAsAQAAMAAJ>
- [12] O. Hong, D. G. Samo, Hazardous decibels: Hearing health of firefighters, Workplace Health & Safety 55 (8) (2007) 313–319. doi:10.1177/216507990705500803.
URL <https://doi.org/10.1177/216507990705500803>
- [13] Y. S. Huang, Y. S. Weng, M. Zhou, Design of traffic safety control systems for emergency vehicle preemption using timed petri nets, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 16 (4) (2015) 2113–2120. doi:10.1109/TITS.2015.2395419.
- [14] T. M. Kwon, S. Kim, Development of dynamic route clearance strategies for emergency vehicle operations, phase i.
- [15] J. R. Bycraft, Green light pre-emption of traffic signals for emergency vehicles richmond, british columbia’s approach, City of Richmond Traffic Signal Control System.

-
- [16] E. Kwon, S. Kim, R. Betts, Route-based dynamic preemption of traffic signals for emergency vehicles operations, in: Proceedings of the TRB Annual Meeting, Vol. 9, 2003.
- [17] C.-M. Huang, C.-C. Yang, C.-Y. Tseng, C.-H. Chou, A centralized traffic control mechanism for evacuation of emergency vehicles using the DSRC protocol, in: 2009 4th International Symposium on Wireless Pervasive Computing, IEEE, 2009, pp. 1–5. doi:10.1109/iswpc.2009.4800550. URL <https://doi.org/10.1109/iswpc.2009.4800550>
- [18] S. R. Rizvi, S. Olariu, M. C. Weigle, M. E. Rizvi, A novel approach to reduce traffic chaos in emergency and evacuation scenarios, in: 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference, IEEE, 2007, pp. 1937–1941. doi:10.1109/VETECF.2007.407.
- [19] M. I. Ashraf, C.-F. Liu, M. Bennis, W. Saad, Towards low-latency and ultra-reliable vehicle-to-vehicle communication, in: 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), IEEE, 2017, pp. 1–5. doi:10.1109/EuCNC.2017.7980743.
- [20] D. Krajzewicz, G. Hertkorn, C. Rössel, P. Wagner, Sumo (simulation of urban mobility) - an open-source traffic simulation, in: A. Al-Akaidi (Ed.), 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling, 2002, pp. 183–187, IIDO-Berichtsjahr=2004,. URL <http://elib.dlr.de/6661/>
- [21] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, L. Bieker, Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility, International Journal On Advances in Systems and Measurements 5 (3&4) (2012) 128–138.
- [22] F. Webster, Traffic signal settings, road research technical paper no. 39, Road Research Laboratory.
- [23] A. V. Goldberg, H. Kaplan, R. F. Werneck, Reach for A*: Efficient point-to-point shortest path algorithms, in: 2006 Proceedings of the Eighth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX), Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006, pp. 129–143. doi:10.1137/1.

9781611972863.13.

URL <https://doi.org/10.1137/1.9781611972863.13>

- [24] M. Semrau, J. Erdmann, Simulation framework for testing adas in chinese traffic situations, in: K. Lemmer (Ed.), SUMO2016, Vol. 30 of Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, DLR, 2016, pp. 103–115.
URL <http://elib.dlr.de/104432/>
- [25] H. B. Mann, D. R. Whitney, On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other, *The Annals of Mathematical Statistics* 18 (1) (1947) 50–60. doi:10.1214/aoms/1177730491.
URL <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- [26] M. Cetin, C. A. Jordan, Making way for emergency vehicles at oversaturated signals under vehicle-to-vehicle communications, in: 2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2012), IEEE, 2012, pp. 279–284. doi:10.1109/ICVES.2012.6294290.
- [27] R. K. Kamalanathsharma, Traffic adaptive offset-based preemption for emergency vehicles, Ph.D. thesis, Virginia Tech (2010).