

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Filip Bišćan, Antonio Bubnić, Andre Garašić, Antun Mandić, Marko Matić

**UTJECAJ AUTONOMNIH VOZILA NA KVALITETU
GRADSKE PROMETNE MREŽE**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za inteligentne transportne sustave pod vodstvom doc.dr.sc. Miroslava Vujića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

POPIS KRATICA

ITS – Intelligentni transportni sustavi

AV – Autonomna vozila

V2V – Vehicle to vehicle

V2I – Vehicle to infrastructure

DSRC – Dedicated short-range communication

GPS – Global positioning system

RADAR – Radio detection and ranging

LIDAR – Light detection and ranging

PTV VISSIM – Verkehr In Städten – SIMulationsmodell

SAŽETAK

Filip Bišćan, Antonio Bubnić, Andre Garašić, Antun Mandić, Marko Matic

UTJECAJ AUTONOMNIH VOZILA NA KVALITETU GRADSKOG PROMETNE MREŽE

Autonomna vozila su u posljednjih nekoliko godina napravila značajne korake u tehničkom i tehnološkom razvoju te će njihova primjena u prometu sve više rasti. Prednosti autonomnih vozila leže u povećanju sigurnosti jer dopunjuju ljudski faktor u vožnji, učinkovitosti, koja smanjuje vrijeme putovanja te optimizira rutu do odredišta. Nadalje, učinkovitija vožnja reducira ispušne plinove čime se smanjuje štetan utjecaj na okoliš. Postoje određeni nedostaci primjene autonomnih vozila kao što su cijena koju je potrebno uložiti u svrhu prilagođavanja infrastrukture, a tu je i problem odluke autonomnih vozila u incidentnoj situaciji. Pitanje je koliki omjer autonomnih vozila i vozila upravljanih čovjekom je potreban kako bi se vidjele koristi te jesu li te koristi isplative. Funkcionalan rad autonomnih vozila omogućen je kooperacijom fizičkih komponenata na vozilu poput: RADAR-a, LIDAR-a, ultrazvučnih senzora, GPS-a i kamera. U svrhu preslikavanja realnog prometnog sustava u simulacijsko okruženje moguće je koristiti simulacijski alat PTV Vissim. Simulacijskim alatom PTV Vissim moguće je odrediti infrastrukturne elemente, napraviti raspodjelu prometnih tokova te postaviti pravila ponašanja u prometu i načine vođenja prometa. Jedna od bitnijih stavki je izmjena parametara za definiranje logike vožnje vozila u simulaciji. Time se može definirati razina autonomnosti samih vozila te mogućnost međusobnog, odnosno kooperativnog djelovanja vozila. U svrhu izrade kalibriranog simulacijskog modela odabranog koridora prometne mreže provedeno je brojanje prometa. Brojanje prometa je provedeno na potezu Zvonimirove ulice, odnosno na raskrižjima Zvonimirove sa Rusanovom, Šulekovom, Kušlanovom i Harambašićevom ulicom u Zagrebu. Prikupljeni prometni podaci u simulaciji predstavljaju trenutno stanje prometnog sustava. Kako bi se analizirao utjecaj autonomnih vozila provedeno je više simulacija sa različitim udjelima autonomnosti u prometnoj mreži. Ti omjeri su redom: 0%, 25%, 50%, 75% te 100% autonomnih vozila u prometnoj mreži. Nakon svih provedenih simulacija, detaljnom analizom dobivenih podataka, dan je uvid u ponašanje na prometnoj mreži, te odabir najučinkovitijeg rješenja. Analiza je pokazala da su se svi prometni parametri,

poput vremena putovanja, duljine kolone te zauzeća javljanjem autonomnih vozila malo pogoršali, zbog toga što su autonomna vozila opreznija s vozilima koja su upravljana od strane prosječnog vozača. Daljnjim povećanjem omjera autonomnih vozila prometni parametri se poboljšavaju i premašuju prometne parametre izračunate kada prometni sustav nema autonomnih vozila. Takvi rezultati pokazuju da će primjenom autonomnih vozila razina usluge koju nudi prometni sustav blago pasti dok autonomna vozila ne budu zastupljena u većem postotku.

Ključne riječi: autonomna vožnja, razina uslužnosti, raskrižja sa semaforima, parametri ponašanja vozača.

SUMMARY

Filip Bišćan, Antonio Bubnić, Andre Garašić, Antun Mandić, Marko Matic

THE INFLUENCE OF AUTONOMOUS VEHICLES ON THE QUALITY OF THE CITY TRANSPORT NETWORK

In the last few years, autonomous vehicles have made significant strides in technical and technological development, and their application in traffic will continue to grow. The advantages of autonomous vehicles lie in increased safety because they complement the human factor in driving, efficiency, which reduces travel time and optimizes the route to the destination. Furthermore, more efficient driving reduces exhaust gases, which reduces the harmful impact on the environment. There are certain disadvantages of the application of autonomous vehicles, such as the price that needs to be invested in order to adjust the infrastructure, and there is also the problem of the decision of autonomous vehicles in an incident situation. The question is what ratio of autonomous vehicles to human-driven vehicles is needed to see the benefits and whether those benefits are worthwhile. The functional operation of autonomous vehicles is made possible by the cooperation of physical components on the vehicle such as: RADAR, LIDAR, ultrasonic sensors, GPS and cameras. In order to map the real traffic system into the simulation environment, it is possible to use the PTV Vissim simulation tool. With the PTV Vissim simulation tool, it is possible to determine infrastructural elements, makes the distribution of traffic flows, and set the rules of traffic behaviour and methods of traffic management. One of the more important items is changing the parameters for defining the logic of vehicle driving in the simulation. This can define the level of autonomy of the vehicles themselves and the possibility of mutual or cooperative action of the vehicles. In order to create a calibrated simulation model of the selected corridor of the traffic network, a traffic count was carried out. Traffic counting was carried out on the stretch of Zvonimirova Street, that is, at the intersections of Zvonimirova Street with Rusanova, Šulekova, Kušlanova and Harambašićeva Streets in Zagreb. The traffic data collected in the simulation represent the current state of the traffic system. In order to analyse the influence of autonomous vehicles, several simulations were carried out with different shares of autonomy in the traffic network. These ratios are respectively: 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of autonomous vehicles in the

traffic network. After all the simulations, a detailed analysis of the obtained data provided an insight into the behaviour of the traffic network, and the selection of the most effective solution. The analysis showed that all traffic parameters, such as travel time, queue length and occupancy by the presence of autonomous vehicles, slightly worsened, due to the fact that autonomous vehicles are more careful with vehicles driven by the average driver. By further increasing the ratio of autonomous vehicles, the traffic parameters improve and exceed the traffic parameters calculated when the traffic system has no autonomous vehicles. Such results show that with the application of autonomous vehicles, the level of service offered by the transport system will slightly decrease until autonomous vehicles are represented in a higher percentage.

Key words: autonomous driving, level of service, intersections with traffic lights, driver behaviour parameters.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 Problem, ciljevi i metode izrade rada.....	2
1.2 Struktura rada	3
2. KONCEPT AUTONOMNIH VOZILA	5
2.1 Prednosti i nedostaci autonomnih vozila	7
2.2 Razine autonomnosti vozila.....	9
2.3 Fizičke komponente autonomnih vozila.....	11
2.3.1 Video kamera	11
2.3.2 Radar.....	13
2.3.3 LIDAR.....	14
2.3.4 GPS – Globalni pozicijski sustav	15
2.3.5 Ultrazvučni senzor	16
2.3.6 Centralno računalo	17
2.3.7 Namjenske komunikacije kratkog dometa	17
3. RELEVANTNI SIMULACIJSKI PARAMETRI AUTONOMNE VOŽNJE	19
3.1 PTV Vissim simulacijski alat	19
3.2 Simulacijski parametri autonomne vožnje	21
4. PRIKAZ ODABRANOG KORIDORA ZA ANALIZU UTJECAJA AUTONOMNIH VOZILA.....	25
4.1 Analiza signalnog plana.....	25
4.2 Ul. kralja Zvonimira-Rusanova ulica.....	28
4.3 Ul. kralja Zvonimira-Šulekova ulica	31
4.4 Ul. kralja Zvonimira-Dragojla Kušlana	35
4.5 Ul. kralja Zvonimira-Harambašićeva ulica	39
4.6 Prikaz odabranog koridora za analizu utjecaja autonomnih vozila	43
5. SCENARIJI UDJELA AUTONOMNIH VOZILA NA PROMATRANOM KORIDORU .	47
5.2 Simulacija s 25% udjela autonomnih vozila.....	51
5.3 Simulacija s 50% udjela autonomnih vozila.....	53
5.4 Simulacija s 75% udjela autonomnih vozila.....	55
5.5 Simulacija s 100% udjela autonomnih vozila.....	57
6. RASPRAVA.....	60
7. ZAKLJUČAK	65
ZAHVALA.....	66

LITERATURA	67
DODACI	70

1. UVOD

Svakodnevno povećanje broja vozila dovodi do stvaranja prometnih zagušenja koja smanjuju kvalitetu gradske prometne mreže. Zbog tih razloga vidljiva je potreba za konstantnim unaprjeđenjem prometnog sustava. Brzo rastući tehnološki trendovi omogućili su brz razvoj cjelokupnog društva, pa tako i prometnog sustava. Samim time, pojavljuju se razni sudionici na tržištu koji svojim tehnološkim znanjem i ambicijom stvaraju nove inovacije u prometnom sustavu.

Problemi često proizlaze iz samih pogrešaka vozača, bilo da se radi o stvaranju sudara ili lošim sposobnostima vožnje. Isto tako, problemi mogu proizlaziti iz samog načina upravljanja prometa, kako na mikrolokaciji tako i na makrolokaciji. Najveći tehnološki napredak se pojavio u samim automobilima, gdje se korištenjem raznih sustava u kombinaciji sa sensorima povećavaju udobnost i sigurnost te se smanjuje mogućnost nastanka prometne nesreće.

Daljnijim razvojem tehnologije dolazi se do novog koncepta autonomnih vozila. To su vozila gdje intervencija vozača nije potrebna, nego vozilo samo provodi sve potrebne radnje u vožnji, čime se običan vozač pretvara u putnika. Uvođenjem autonomnih vozila očekuje se potpuno uklanjanje prometnih zagušenja te mogućnost pojave prometnih nesreća. Takav rezultat bio bi posljedica povezivanja prometnih vozila i prometne infrastrukture koje bi u svakom trenutku komunicirale i reagirale na negativne situacije.

Potreban je još dug niz godina kako bi se postigla potpuna autonomnost, no sama mogućnost integracije nekolicine autonomnih vozila u trenutne prometne sustave polako raste. Pitanje glasi, kako bi određeni postotak utjecao na samo funkcioniranje prometa. U svrhu pronalaženja odgovora na to pitanje, potrebno je koristiti razne simulacijske alate kako bi se utvrdila okvirna slika o tome kako bi promet reagirao na uvođenje određenog postotka autonomnih vozila, odnosno kako bi prometni sustav funkcionirao sa stopostotnom prisutnošću autonomnih vozila.

U svrhu ovog rada koristit će se programski alat PTV Vissim, te će se istraživati simulacijski parametri potrebni za postizanje željenih rezultata. PTV Vissim je simulacijski alat koji koristi kompleksne interakcije vozila na mikrorazini kako bi precizno opisao prometnu situaciju, čime postiže visokokvalitetnu simulaciju realnog prometnog sustava.

Koristeći simulacijski alat PTV Vissim napravljene su simulacije uobičajenih prometnih situacija. Sami sudionici u prometu su podijeljeni na dvije skupine: realni vozači i autonomna vozila (idealni vozač). Provedeno je više simulacija različitih omjera skupina. Pripadnost autonomnih vozila je kalibrirano postojeće stanje (pretpostavljen udio autonomnih vozila je 0%), zatim 25%, 50%, 75% i 100% udjela u prometnoj mreži.

Nakon provedenih simulacija izvedeni su podaci za utvrđivanje razine usluge promatrane prometne mreže te je provedena analiza svih podataka s ciljem utvrđivanja prometnog sustava s obzirom na povećanje postotka autonomnih vozila u prometu.

1.1 Problem, ciljevi i metode izrade rada

Autonomna vozila svojom ekspanzivnom primjenom u prometu daju nepredvidljiv proces implementacije vozila u periodu gdje će ona biti zastupljena u određenim omjerima. Razvojem industrije samih autonomnih vozila, dolazi do njihove sve veće primjene, kako u komercijalnim svrhama poput popularno nazvanih robo-taksi vozila, tako i u osobnim primjenama. Problemi nastaju u implementaciji autonomnih vozila u nespremnu postojeću cestovnu infrastrukturu i u okruženje u kojem nemaju povjerenje ostalih sudionika u prometu. Isto tako postoje problemi pravila ponašanja autonomnih vozila koja je potrebno definirati u slučaju međusobnog djelovanja na prometnicama sa stvarnim vozačima, odnosno ljudima.

Cilj rada je dati uvid kako će se postepenom implementacijom autonomnih vozila prometni sustav ponašati kao cjelina. Samim time, nastoji se utvrditi postoji li korist primjene manjih postotaka autonomnih vozila, odnosno je li potrebna potpuna automatizacija prometa kako bi sama ideja imala pozitivan učinak. Uz to, potrebno je procijeniti je li korist opravdava uloženi napor.

Metoda izrade rada uključila je proces analize trenutnog prometnog stanja promatranog dijela gradske prometne mreže na potezu Zvonimirove ulice (od križanja sa Šulekovom ulicom do križanja sa Harambašićevom ulicom). Izvršeno je brojanje prometa u vršnom satu kako bi se prikupili realni podaci. Testiranja samog prometnog sustava su provedena koristeći programski alat PTV Vissim koji daje mogućnost prikaza same prometne mreže i njenih infrastrukturnih elemenata. Određivanjem parametara ponašanja vozila u simulaciji napravljena je distinkcija između prosječnog vozača i autonomnih vozila koji su zastupljeni u određenim omjerima. Postepenim izmjenama tih omjera, odabrani evaluacijski parametri

opisuju kako autonomna vožnja koja teži idealnom, savršenom vozaču, utječe na odvijanje prometa i na kvalitetu prometne mreže.

1.2 Struktura rada

Nakon definiranih problema, ciljeva i metoda izrade, definirana je sljedeća struktura rada. U poglavlju UVOD definirani su problem i predmet istraživanja, određeni su ciljevi i svrha istraživanja te je objašnjena primjena znanstvenih metoda kao i struktura rada.

U drugom poglavlju, KONCEPT AUTONOMNIH VOZILA, opisan je pojam autonomnih vozila te njihova obilježja. Primjena tehnologije autonomnih vozila ima određene prednosti poput povećanja mobilnosti, kraćeg vremena putovanja, smanjenja utjecaja vozača kao krivca u prometnim nezgodama i nesrećama itd. Opisani su nedostaci koji utječu na sporiju primjenu sustava u realnom sektoru. Za kreiranje autonomnog vozila potrebno je kreirati određen skup elektroničkih sustava te ih objediniti na način da centralno računalo donosi odluke na temelju svih informacija. Neki od tih uređaja su RADAR, Lidar, GPS, kamere te ultrazvučni senzori.

U trećem poglavlju, RELEVANTNI SIMULACIJSKI PARAMETRI AUTONOMNE VOŽNJE, istražuju se bitni parametri koji opisuju autonomnu vožnju uz nabrojanje onih koji se nalaze unutar PTV Vissim alata. Osim toga, daju se i preporuke za postizanje određenih logika vožnje.

U četvrtom poglavlju, PROMATRANO PODRUČJE OBUHVATA PROMETNE ANALIZE, daje se detaljan opis prostornog obuhvata prometne analize, od lokacije same prometne mreže, pa sve do signalnog plana svakog semaforiziranog raskrižja. Isto tako, dati su podaci ručnog brojanja prometa te grafički prikaz opterećenja svih prometnih tokova promatrane prometne mreže. Isto tako, opisuje se način postavljanja samih simulacija. Uz to, detaljno se opisuju svi koraci potrebni za izradu prometne mreže, raspodjela prometnih tokova te prometnog opterećenja, postavljanje signalnih planova, mjera za prikupljanje simulacijskih podataka te postavljanje logike vožnje i postotak autonomnih vozila.

U petom poglavlju, SCENARIJI UDJELA AUTONOMNIH VOZILA NA PROMATRANOM KORIDORU, opisuju se i priloženi su svi dobiveni podaci svih provedenih

simulacija. Izvučeni podaci opisuju razinu usluge za svako promatrano raskrižje te ekološki utjecaj odvijanja prometa.

U šestom poglavlju, RASPRAVA, provodi se detaljna analiza i usporedba podataka svih simuliranih scenarija. Podaci se izravno uspoređuju unutar tablica, odnosno korištenjem grafičkih prikaza na temelju kojih se daju mane i prednosti pojedinog scenarija.

U posljednjem poglavlju, ZAKLJUČAK, dan je zaključak analize te mogućnosti primjene prijelaznih matrica brzina kao i podloga za buduća istraživanja.

2. KONCEPT AUTONOMNIH VOZILA

Autonomna vozila su vozila koja imaju sposobnost vožnje bez ljudske intervencije. Ona koriste razne senzore, kamere, GPS i ostale napredne algoritme za otkrivanje okoline i donošenje odluka u skladu s prikupljenim informacijama. Ova tehnologija ima potencijal napraviti revoluciju u transportnoj industriji, pritom čineći prijevoz učinkovitijim i sigurnijim, kako za vozače, tako i za putnike [1].

Prvi prototip autonomnog automobila je razvio Francis Houdina dvadesetih godina prošlog stoljeća. Vozilo je koristilo sustav kamera i radio signala za navigaciju cestom. Nažalost, razina korištene tehnologije je bila previše napredna za svoje vrijeme i projekt je napušten.

Tek 1950-ih i 1960-ih tehnologija autonomnih vozila započinje svoj intenzivan razvoj. General Motors 1958. godine razvija prototip autonomnog automobila pod nazivom "Firebird III". Firebird III koristio je sustav za navođenje koji se oslanjao na niz senzora za navigaciju cestom. Međutim, Firebird III nikada nije bio masovno proizveden.

Šezdesetih godina prošlog stoljeća američka vlada počela je financirati istraživanje autonomnih vozila kao dio svojih pretenzija za razvoj novih vojnih tehnologija. Jedan od najznačajnijih projekata ovog doba bio je "Stanford's cart", kojeg su razvili istraživači sa Sveučilišta Stanford. Kolica su bila vozilo s četiri kotača koje je moglo obilaziti prepreke te slijediti unaprijed programiranu putanju pomoću sustava senzora i kamera. Sedamdesetih godina prošlog stoljeća došlo je do porasta interesa za tehnologiju autonomnih vozila. Godine 1971. Sveučilište u Edinburghu razvilo je prototip autonomnog automobila pod nazivom "Roadrunner". Roadrunner je koristio sustav kamera i senzora za navigaciju cestom te je mogao postići brzinu do 20 milja na sat. Godine 1977. održana je prva utrka autonomnih vozila u Fort George G. Meadeu u Marylandu. Utrku je organizirala Agencija za napredne obrambene istraživačke projekte (DARPA), a sudjelovala su vozila koja su razvili istraživači sa sveučilišta i privatnih tvrtki. U utrci je pobijedilo vozilo koje je razvilo Sveučilište Carnegie Mellon [2].

Osamdesetih godina prošlog stoljeća dolazi do razvoja novih tehnologija koje će biti ključne za razvoj autonomnih vozila. Godine 1986. NavLab tim Sveučilišta Carnegie Mellon razvija prvo autonomno vozilo sposobno za navigaciju gradskim ulicama. Vozilo poznato kao "NavLab 1", koristilo je sustav kamera i senzora za otkrivanje prepreka i navigaciju cestom. Godine 1987. američki Kongres donio je Zakon o površinskom prijevozu i jedinstvenoj pomoći

pri preseljenju, koji je uključivao odredbe za financiranje istraživanja ITS-a (inteligentnih transportnih sustava), pritom uključujući autonomna vozila [2].

U 1990-ima, razvoj tehnologije autonomnih vozila nastavio se ubrzavati. Godine 1994. istraživači Laboratorija za mlazni pogon (JPL) razvili su Autonomous Land Vehicle (engl. ALV). ALV je bilo vozilo sa šest kotača koje je moglo upravljati terenom pomoću sustava senzora i kamera.

Godine 1995. održan je prvi DARPA Grand Challenge. Izazov je bila utrka kroz pustinju Mojave u kojoj su sudjelovala autonomna vozila koja su razvili timovi sa sveučilišta i privatnih tvrtki. U utrci je pobijedilo vozilo koje je razvilo Sveučilište Carnegie Mellon [2].

U 2000-ima dolazi do razvoja novih tehnologija koje su bile dodatan poticaj u razvoju autonomnih vozila. Godine 2004. Google je počeo raditi na svom projektu autonomnog automobila, koji će na kraju postati Waymo. Tvrtka je koristila kombinaciju senzora, kamera i naprednih algoritama za razvoj autonomnog automobila sposobnog za navigaciju cestom bez ljudske intervencije [2].

Godine 2010. Google-ov projekt autonomnog automobila privukao je svjetsku pozornost kada je objavljeno da je tvrtka razvila automobil koji može voziti javnim cestama. Ovo je označilo značajnu prekretnicu u razvoju autonomnih vozila, jer je pokazalo da je tehnologija sposobna raditi u stvarnim uvjetima. Godine 2012. Nevada je postala prva savezna država koja je legalizirala vožnju autonomnih vozila na javnim cestama. Slijedile su Kalifornija, Florida i Michigan, koje su također donijele zakone koji dopuštaju testiranje i rad autonomnih automobila. Tijekom prošlog desetljeća razvoj tehnologije autonomnih vozila nastavio se ubrzavati. Godine 2015. Tesla je predstavila svoj sustav autopilota koji je vozačima omogućio da skinu ruke s volana i puste automobil da sam vozi autocestama. Međutim, sustav se suočio s kritikama jer se previše oslanja na vozača, gdje je isti morao preuzimati kontrolu u hitnim situacijama. Godine 2016. Uber je pokrenuo svoj program autonomnih automobila u Pittsburghu, Pennsylvania. Program je osmišljen za testiranje autonomnih vozila u stvarnom okruženju i smatran je značajnim korakom naprijed u razvoju autonomnih automobila. Međutim, program je također bio narušen kontroverzama, uključujući smrtonosnu nesreću 2018. u kojoj je sudjelovao jedan od Uberovih autonomnih automobila. Godine 2018. Waymo je pokrenuo svoju komercijalnu uslugu autonomnih automobila u Phoenixu, Arizona. Usluga pod nazivom Waymo One omogućila je korisnicima da zatraže autonomni automobil pomoću mobilne aplikacije. Lansiranje Waymo One označilo je značajnu prekretnicu u razvoju

autonomnih vozila, jer je pokazalo da je tehnologija sposobna funkcionirati kao komercijalna usluga [2].

Danas tehnologiju autonomnih vozila razvija širok raspon tvrtki, od etabliranih proizvođača automobila poput Forda i General Motorsa do tehnoloških divova poput Applea i Amazona. Tehnologija se također razvija za širok raspon aplikacija, uključujući dijeljenje prijevoza, usluge dostave i javni prijevoz [2].

Autonomna vožnja danas postupno postaje operativna tehnologija. Očekuje se da će njezin razvoj značajno promijeniti prometni sustav u nadolazećem vremenu. Budući da su autonomna vozila opremljena raznim sensorima i komunikacijskim tehnologijama, za pretpostaviti je da će se njihovom uporabom sigurnost na cestama dodatno povećavati u usporedbi s konvencionalnim vozilima kojima upravlja čovjek. Uz povećanu sigurnost, predviđa se poboljšanje ukupne prometne učinkovitosti, a time i protoka prometa zbog homogenijeg stila vožnje autonomnih vozila u usporedbi s ljudskim vozačima [3]. Potpunim preuzimanjem procesa vožnje autonomna vozila više neće imati potrebu za vozačem, dok će korisnici preuzeti ulogu putnika.

2.1 Prednosti i nedostaci autonomnih vozila

Autonomna vozila će svojim pojavljivanjem imati veliki utjecaj na cjelokupni prometni sustav kakvog trenutno poznajemo. Takva promjena ima brojne prednosti uključujući poboljšanu sigurnost, povećanu mobilnost, smanjene gužve te povećanje pozitivnog utjecaja na okoliš.

Sigurnost je najvažnija prednost autonomnih vozila u odnosu na vozače, jer je ljudska pogreška vodeći uzrok prometnih nesreća. Najčešće greške vozača zbog kojih dolazi do prometnih nesreća, prema Pravilniku o načinu postupanja policijskih službenika u obavljanju poslova nadzora i upravljanja prometom na cestama, su nepropisna brzina, brzina neprimjerena uvjetima, vožnja na nedovoljnoj udaljenosti, zakašnjelo uočavanje opasnosti, nepropisno pretjecanje, obilaženje i mimoilaženje, nepropisno uključivanje u promet, nepropisno skretanje i okretanje te nepropisna vožnja unatrag [4]. Autonomna vozila imaju potencijal eliminirati ovaj problem uklanjanjem ljudskog elementa iz jednadžbe vožnje, što bi moglo dovesti do sigurnijeg i učinkovitijeg prijevoza [5].

Autonomna vozila također mogu poboljšati **mobilitnost** pružajući mogućnosti prijevoza za ljude koji ne mogu upravljati vozilom zbog starosti, invaliditeta ili drugih čimbenika. Ona se također mogu koristiti za učinkovitiji prijevoz ljudi i robe, čime skraćuju vrijeme putovanja te poboljšavaju pristup uslugama i sadržajima. Isto tako, poboljšanje mobilnosti ima učinak smanjenja gužvi na cestama. Pokazalo se da autonomna vozila mogu smanjiti prometne gužve do 60% korištenjem učinkovitijeg rutiranja i smanjenjem broja automobila na cesti [6].

Također, autonomna vozila mogu imati pozitivan utjecaj na odvijanje prometa s **ekološkog aspekta**, gdje se njihovim uvođenjem stvara prilika smanjenja emisija štetnih ispušnih plinova [7]. Samim time došlo bi do povećanja kvalitete zraka i usporavanja klimatskih promjena koji predstavljaju jedan od glavnih problema današnjice [8]. Uz već spomenute prednosti povećanja prometne sigurnosti i mobilnosti, autonomna vozila imaju priliku smanjiti troškove putovanja, potrebu za parkiranjem te mogu stvoriti dodatno slobodno vrijeme za putnike [7]. Uz to, otvorit će se mogućnost lakšeg planiranja i izbora rute putovanja što će dodatno uštediti vrijeme ljudi [8]. Dodatno, implementacija autonomnih vozila će imati utjecaj na individualno ponašanje pri putovanju, u što spadaju generiranje putovanja, odabir načina samog putovanja te vrijeme njegovog trajanja. Rezultati određenih studija su pokazali da se vrijeme putovanja smanjuje kako se povećava implementacija sustava autonomnih vozila [9]. Samo vrijeme „prodora“ autonomnih vozila u našu svakodnevicu je nepoznato. Predviđa se da će u sljedećih 7 do 8 godina autonomna vozila činiti barem pola od ukupnog udjela vozila na cestama. Kod implementacije sustava autonomnih vozila veliku ulogu ima prometno modeliranje kroz simulaciju interakcije autonomnih i konvencionalnih vozničkih parkova za planiranje i upravljanje sadašnjom, te budućom prometnom infrastrukturom.

Unatoč ovim prednostima, postoje razni problemi i izazovi povezani s autonomnim vozilima. Jedna od najvećih briga je potencijalni gubitak radnih mjesta, budući da bi mnoga zanimanja poput taksista i vozača kamiona mogla zastarjeti. Nadalje, nastaje potreba za novom infrastrukturom i propisima za podršku autonomnim vozilima. To uključuje razvoj novih zakona i propisa koji reguliraju rad ovih vozila i izgradnju nove infrastrukture, kao što su stanice za punjenje i komunikacijske mreže, za podršku njihovoj upotrebi. Također, postoje etička razmatranja povezana s autonomnim vozilima. Na primjer, u situacijama u kojima je nesreća neizbježna, vozilo će možda morati donijeti odluku o tome koju će radnju poduzeti, što može dovesti do ozljeđivanja putnika ili drugih pojedinaca. Na kraju, tu je i pitanje kibernetičke sigurnosti. Autonomna vozila oslanjaju se na složen softver i komunikacijske sustave, što ih čini ranjivima na kibernetičke napade. Neophodno je razviti snažne sigurnosne mjere za zaštitu

ovih vozila od hakera te drugih zlonamjernih aktera [10]. Uz navedenu problematiku, postoji i problem kod procjene utjecaja autonomnih vozila na zagušenja te na samu sigurnost prometa. Kvalitetnu procjenu je moguće napraviti samo u pažljivo osmišljenim simulacijama. Budući da postoji velik broj složenih čimbenika koji utječu na buduće implementacije sustava autonomnih vozila, potrebno je napomenuti da se većina postojećih studija prvenstveno fokusira na podskup cjelovite slike, tj. ocjenjuje se samo jedna vrsta razine automatizacije, utjecaj samo na jednu vrstu mreže cesta, dok se sigurnost i protok ocjenjuju odvojeno gdje se zatim donose pojednostavljene pretpostavke o obrascima prometne potražnje [11].

2.2 Razine autonomnosti vozila

Autonomna vozila mogu se kategorizirati u razine ovisno o razini automatizacije. Razina 0 nema niti jednu automatiziranu funkciju, dok razina 5 predstavlja potpuno autonomno vozilo gdje vozač postaje putnik u tom vozilu. Neka vozila se prikazuju kao "autonomna", a to nisu u punom smislu te riječi. Ona mogu biti sposobna raditi samo na određenoj razini autonomije, gdje se od vozača može tražiti preuzimanje kontrole nad vozilom u određenim situacijama. Tablica 1 opisuje pojedinu razinu autonomnih vozila.

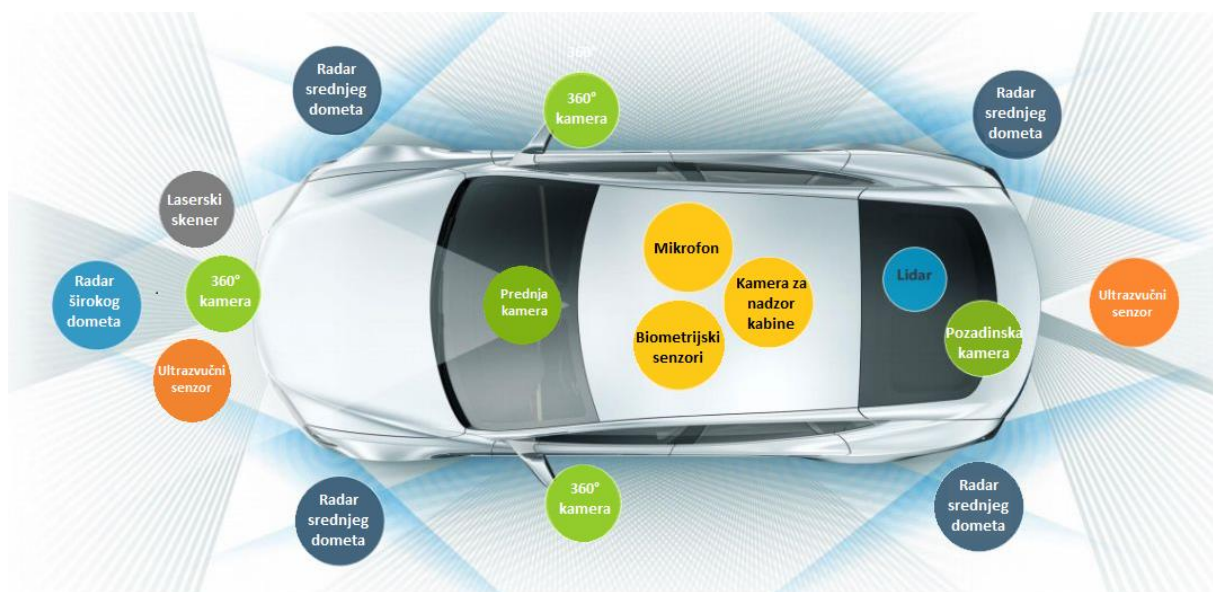
Tablica 1. Razine autonomnosti [12]

Razina autonomnosti	Opis
Razina 0	Nema automatizacije. Vozač je odgovoran za sve aspekte vožnje, uključujući upravljanje, kočenje i ubrzavanje. Aktivirane su tek neke funkcije povećanja udobnosti (registracija mrtvog kuta, automatsko aktiviranje vjetrobranskih brisača)
Razina 1	Autonomnost specifičnih funkcija. Vozilo može kontrolirati ili upravljanje ili ubrzanje/usporavanje, ali ne i oboje. Vozač je i dalje u potpunosti odgovoran za sigurnost odvijanja vožnje.
Razina 2	Djelomična automatizacija. Vozilo može istovremeno kontrolirati i upravljanje i ubrzavanje/usporavanje. Istaknut je doprinos pri dužim vožnjama gdje vozač i dalje mora samostalno vršiti vožnju, te reagirati na aktivaciju pojedinih upozorenja.
Razina 3	Uvjetna automatizacija. Vozilo je sposobno samostalno voziti u određenim situacijama, ali vozač mora biti spreman preuzeti kontrolu nad vozilom.
Razina 4	Visoka automatizacija. Vozilo je sposobno voziti samo u većini situacija, ali ipak može zahtijevati intervenciju vozača u nekim slučajevima. Vozač ne mora pažljivo pratiti tijek odvijanja vožnje, ali mora biti spreman preuzeti kontrolu ukoliko je potrebno. Vozilo može upozoriti vozača (na vrijeme) da će morati preuzeti kontrolu ukoliko predvidi takvu situaciju.
Razina 5	Potpuna automatizacija. Vozilo se može samostalno voziti u svim situacijama te nema potrebe za vozačem.

Proizvođači automobila trenutno testiraju vlastite napredne sustave pomoći vozaču kao prvu razinu automatizacije, a u nekim slučajevima i prototip vozila viših razina automatizacije. Kao primjer se može uzeti ADAS (engl. *Advanced Driver Assistance Systems*) koji predstavlja napredni sustav za podršku vozačima u vožnji. Neki testovi su djelomično provedeni na javno dostupnim cestama, za čiju su svrhu postavljena testna polja s inteligentnom infrastrukturom u nizu gradova i regija. Međutim, još uvijek postoje neka otvorena ili ne do kraja riješena pitanja koja čine predmet aktualnih istraživanja. Dosta pozornosti je pridodano validaciji i verifikaciji autonomnih vozila, što uključuje analizu komponenti umjetne inteligencije za koju se očekuje da će u budućnosti zamijeniti ljudske vozače kao donositelje odluka [3].

2.3 Fizičke komponente autonomnih vozila

Da bi autonomno vozilo dovelo do optimalnog rada, potrebno je imati skup komponenti koje pružaju informacije centralnom pametnom sustavu koji će interpretirati te podatke, te će na temelju njih donijeti pravilnu odluku. Te komponente su: kamere, RADAR, LIDAR, GPS, ultrazvučni senzori, centralno računalo i DRSC. Slika 1 pokazuje sve komponente potrebne za autonomnu vožnju.



Slika 1. Komponente autonomnih vozila [13]

Sve komponente rade u kombinaciji kako bi se donijela optimalna odluka. Centralno računalo obrađuje dolazne informacije sa pojedinih komponenata te donosi pravilniju odluku jer se ne oslanja na pojedinačnu komponentu i informaciju o prometnoj situaciji koju pruža.

2.3.1 Video kamera

Video kamere su obično montirane na vozila na način da bi se uhvatio 360-stupanjski pogled na okoliš vozila. Kamere korištene u autonomnim vozilima obično su digitalne kamere visoke rezolucije, sposobne snimiti detaljne slike i video. Ove kamere mogu biti opremljene značajkama poput optičkog zuma, stabilizacije slike i automatskog fokusiranja kako bi se poboljšale njihove performanse u različitim uvjetima vožnje.

Jedna od primarnih funkcija kamera u autonomnim vozilima je osigurati otkrivanje i prepoznavanje objekata. Analizirajući slike koje su snimile kamere, računalo vozila može

identificirati i pratiti predmete poput ostalih vozila, pješaka i prepreka na kolniku. Nakon toga, ove informacije se koriste za informiranje o postupku donošenja odluka vozila, poput prilagođavanja njegove brzine ili smjera, s ciljem izbjegavanja sudara. Video kamere se također koriste zajedno s drugim sensorima, poput LIDAR-a i radara, u svrhu pružanja cjelovitije slike okoliša vozila. Na primjer, video kamere se mogu koristiti za otkrivanje boje prometnog signala, dok LIDAR može pružiti informacije o udaljenosti i položaju drugih vozila [14]. Slika 2 pokazuje pozicije video kamere na automobilu kako bi se postigla preglednost od 360°.

Druga važna upotreba kamere u autonomnim vozilima je za mapiranje i lokalizaciju. Snimanjem slika okoline vozila, centralno računalo vozila može stvoriti detaljnu kartu okoliša, uključujući znamenitosti i cestovne oznake. Ove informacije se tada mogu koristiti za pomoć vozilu u kretanju u okolini i utvrđivanju njegovog položaja [14].



Slika 2. Položaj 360° kamera u automobilu [15]

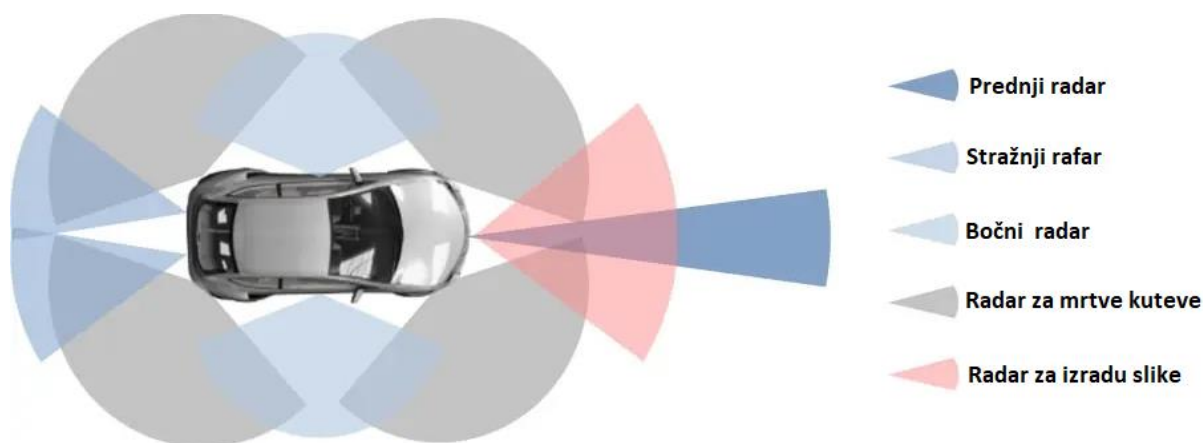
Druga važna upotreba kamere u autonomnim vozilima je za mapiranje i lokalizaciju. Snimanjem slika okoline vozila, centralno računalo vozila može stvoriti detaljnu kartu okoliša, uključujući znamenitosti i cestovne oznake. Ove informacije se tada mogu koristiti za pomoć vozilu u kretanju u okolini i utvrđivanju njegovog položaja.

2.3.2 Radar

Radar je uređaj koji se koristi u autonomnim vozilima te igra kritičnu ulogu u otkrivanju objekata i izbjegavanju sudara. Radar (engl. *Radio detection and ranging*) koristi radio valove za otkrivanje prisutnosti i lokacije predmeta u okruženju vozila. Radarski senzori koji se koriste u autonomnim vozilima obično rade u mikrovalnom frekvencijskom rasponu, emitirajući radio valove koji odbijaju obližnje predmete, nakon čega ih senzor otkriva. Radarski senzor tada može izračunati udaljenost, brzinu i smjer ovih objekata, pružajući centralnom računalu u vozilu kritične informacije o svojoj okolini.

Jedna od primarnih funkcija radara u autonomnim vozilima je osigurati otkrivanje objekata i izbjegavanje sudara. Otkrivanjem predmeta u okruženju vozila, centralno računalo može prilagoditi brzinu i smjer vozila kako bi se izbjegao sudar. Na primjer, ako senzor otkrije vozilo ispred koje naglo koči, računalo vozila može automatski nanijeti kočnice kako bi se izbjegao sudar.

Druga važna upotreba radara u autonomnim vozilima je za potrebe funkcionalnost adaptivnog tempomata, što vozilu omogućuje automatsko postavljanje brzine na temelju udaljenosti i brzine vozila ispred sebe. Korištenjem radara za otkrivanje udaljenosti i brzine ostalih vozila na cesti, računalo vozila može prilagoditi brzinu vozila kako bi vozilo održalo sigurnu sljedeću udaljenost [16]. Slika 3 prikazuje pozicije i raspon radara.



Slika 3. RADAR [17]

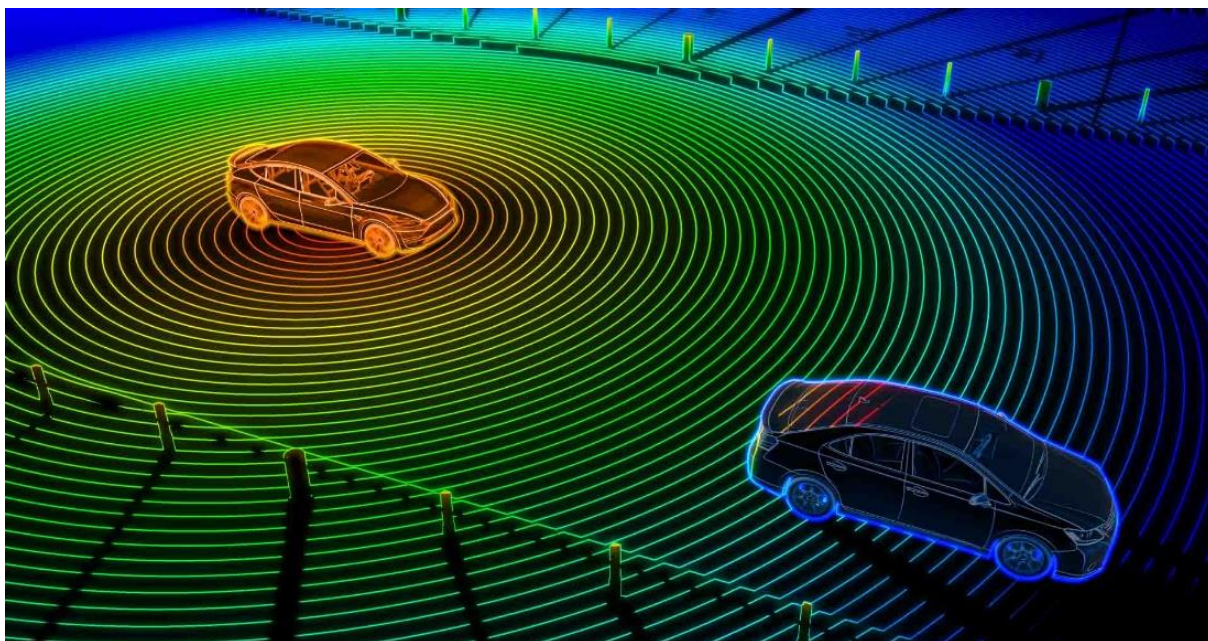
Radarski senzori mogu se koristiti zajedno s drugim sensorima, poput kamera i LIDAR -a, a sve kako bi se pružio sveobuhvatniji pogled na okoliš vozila. Na primjer, radarski senzori mogu pomoći u otkrivanju predmeta koji se mogu zatamniti iz pogleda kamere, poput vozila ili pješaka koji stoje iza drugih objekata. Kako tehnologija i dalje napreduje, radarski senzori

bi trebali postati još napredniji, s poboljšanim rasponom, točnošću i pouzdanošću, pomažući u poboljšanju sigurnosti i pouzdanosti autonomnih vozila [16].

2.3.3 LIDAR

LIDAR (engl. *Light detection and ranging*), još je jedna važna tehnologija koja se koristi u autonomnim vozilima koristeći laserske zrake za otkrivanje prisutnosti i lokaciju predmeta u okruženju vozila. LIDAR senzori emitiraju laserske zrake u različitim smjerovima, gdje time odbijaju obližnje predmete, nakon čega ih senzor otkriva. LIDAR senzor tada može izračunati udaljenost, brzinu i smjer ovih objekata, pružajući autonomnom vozilu kritične informacije o svojoj okolini.

Jedna od glavnih funkcija LIDAR-a u autonomnim vozilima je pružanje vrlo točnih i detaljnih 3D mapa okoliša vozila kao što je prikazano na slici 4. Korištenjem LIDAR-a za izradu detaljne karte okoliša, uključujući lokaciju i veličinu objekata, vozila se mogu kretati svojom okolinom učinkovito i sigurno. To je posebno važno u situacijama kada GPS signali mogu biti slabi ili nepouzdana, poput urbanih područja ili područja s visokim zgradama. LIDAR je također kritičan za otkrivanje objekata i izbjegavanje sudara. Otkrivanjem predmeta u okruženju vozila, vozilo može prilagoditi brzinu i smjer vozila kako bi se izbjegao sudar. LIDAR senzori posebno su učinkoviti u otkrivanju slabo reflektirajućih objekata, poput pješaka i biciklista, što može biti teže za otkrivanje drugih senzora poput radara ili kamera [18].



Slika 4. LIDAR [19]

LIDAR predstavlja kritičnu komponentu tehnologija autonomnih vozila, pružajući vozilu vrlo točne i detaljne informacije o njegovom okruženju. Daljnji napredak LIDAR-a s poboljšanim rasponom, razlučivošću i pouzdanošću će pomoći u poboljšanju sigurnosti i pouzdanosti autonomnih vozila [18].

2.3.4 GPS – Globalni pozicijski sustav

GPS, odnosno globalni pozicijski sustav (engl. *Global Positioning System*), još je jedna tehnologija koja se obično koristi u autonomnim vozilima kako bi se ugradile informacije o njegovoj lokaciji i orijentaciji. GPS je navigacijski sustav temeljen na satelitu koji koristi mrežu satelita za pružanje vrlo točnih podataka o lokaciji i vremenu GPS prijemnicima na terenu kao što je prikazano na slici 5.

Jedna od glavnih funkcija GPS-a u autonomnim vozilima je pružiti vozilu točne i pouzdane informacije o lokaciji. Poznavajući njegov precizan položaj, računalo vozila može planirati i izvršiti rute, kretati se složenim raskrižjima i izbjegavati prepreke na svom putu. To je posebno važno u situacijama kada vizualne informacije mogu biti ograničene, poput uvjeta slabog osvjetljenja ili u područjima s ograničenom vidljivošću [20].

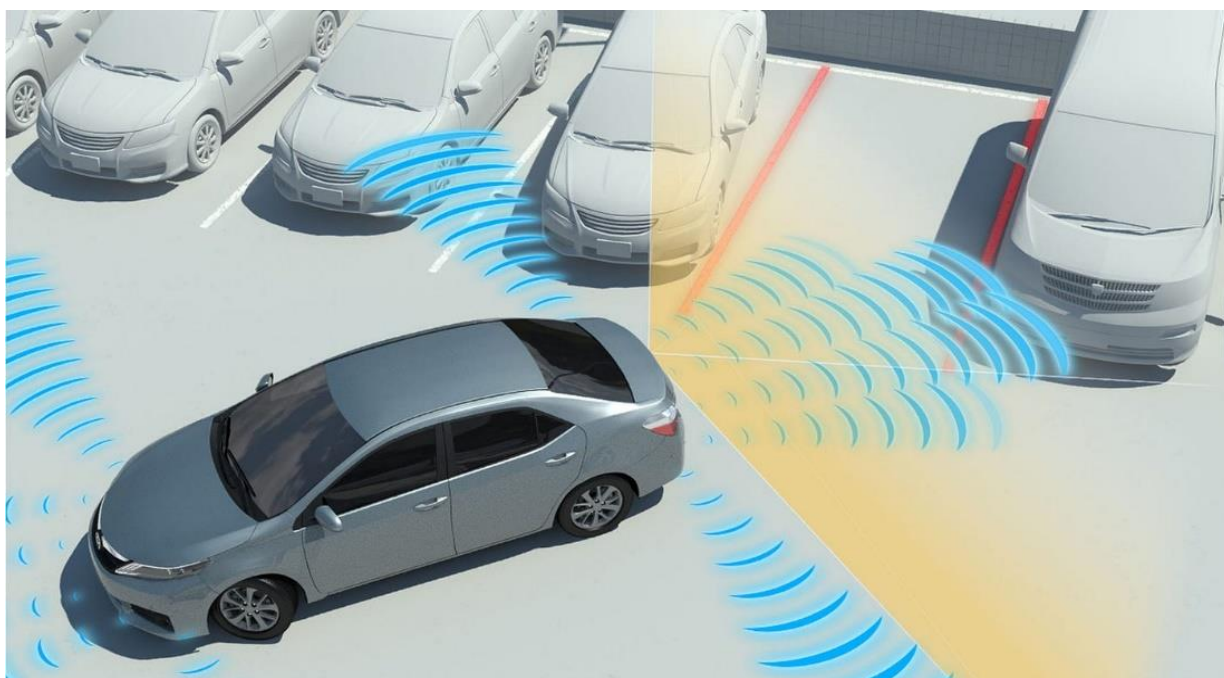


Slika 5. Globalni pozicijski sustav [21]

Druga važna upotreba u autonomnim vozilima je kod upravljanja voznim parkom i u logistici. Praćenjem lokacije i kretanja pojedinih vozila, upravitelj voznog parka može optimizirati rute, nadzirati performanse vozila te poboljšati ukupnu učinkovitost [20].

2.3.5 Ultrazvučni senzor

Ultrazvučni senzori predstavljaju komponente u autonomnim vozilima koje se oslanjaju na visokofrekventne zvučne valove kako bi se otkrila prisutnost te mjesto predmeta u neposrednoj okolini vozila. Emitiranjem zvučnih valova koji odbijaju obližnje predmete, ultrazvučni senzori mogu izračunati udaljenost, brzinu i smjer ovih objekata, pritom pružajući kritične informacije računalu vozila. Funkcije koje ultrazvučni senzor omogućuje u autonomnim vozilima je za parkiranje i manevriranje kao što je prikazano na slici 6 [22].



Slika 6. Upotreba ultrazvučnog senzora pri parkiranju [23]

Također, ultrazvučni senzori mogu poslužiti i kod izbjegavanja sudara. Otkrivanjem predmeta u okruženju vozila, vozilo može prilagoditi brzinu i smjer vozila, pritom pomažući u sprječavanju sudara. Dodatna upotreba ultrazvučnih senzora u autonomnim vozilima je za praćenje slijepog mjesta. Otkrivanjem obližnjih predmeta na slijepim mjestima vozila, vozilo može upozoriti vozača na potencijalne opasnosti, čime mu omogućuje poduzimanje korektivnih mjera s ciljem izbjegavanja sudara [22].

2.3.6 Centralno računalo

Centralno računalo predstavlja ključnu komponentu u autonomnim vozilima, gdje služi kao mozak sustava autonomne vožnje vozila. Centralno računalo je odgovorno za obradu ogromnih količina podataka prikupljenih od strane različitih senzora na vozilu gdje na temelju tih podataka upravlja vozilom, odnosno gdje pruža upute vozaču koji kontrolira pokrete vozila. Također, centralno računalo koristi napredne algoritme za analizu podataka prikupljenih od strane različitih senzora vozila, poput kamere, radara, LIDAR-a, ultrazvučnih senzora i GPS-a. Računalo može otkriti obrasce u podacima i predvidjeti okoliš vozila, poput lokacije i brzine obližnjih predmeta te mjesta vozila u odnosu na okolinu.

Funkcija centralnog računala je planirati put vozila i odrediti njegove postupke kao odgovor na okolno okruženje. Koristeći podatke prikupljene od senzora vozila, računalo može donositi odluke o tome kada treba ubrzati, kočiti i okrenuti, kao i kada izbjegavati prepreke i prilagoditi brzinu i smjer vozila. Nadalje, centralni sustav omogućuje visoku razinu sigurnosti putnika vozila i drugih korisnika cesta. Računalo stalno nadgleda performanse i okoliš vozila, gdje pritom osigurava sigurno djelovanje vozila te pridržavanje svih prometnih zakona i propisa.

Razvojem tehnologije, centralna računala u autonomnim vozilima postaju još sofisticiranija, uključujući napredne algoritme umjetne inteligencije i strojnog učenja kako bi poboljšala vlastite performanse, a time i sigurnost. Takav napredak će biti presudan za široko prihvaćanje autonomnih vozila, a sve u svrhu ostvarivanja sigurnije i pouzdanije autonomne vožnje [10].

2.3.7 Namjenske komunikacije kratkog dometa

Namjenske komunikacije kratkog dometa ili DSRC (engl. *Dedicated Short-Range Communications*) je bežična komunikacijska tehnologija koja vozilima omogućuje međusobno razmjenjivanje informacija te razmjenjivanje informacija s infrastrukturom na cesti. DSRC se može koristiti u autonomnim vozilima za poboljšanje sigurnosti, učinkovitosti i praktičnosti.

Primjena DSRC-a u autonomnim vozilima se promatra kroz komunikaciju od vozila do vozila (V2V – engl. *Vehicle-to-Vehicle*). Razmjennom informacija o njihovoj lokaciji, brzini i smjeru putovanja, vozila mogu zajedno raditi na izbjegavanju sudara, smanjenju zagušenja

prometa i poboljšanju ukupnog protoka prometa. Na primjer, ako vozilo iznenada zakoči, ono može prenijeti ove podatke u obližnja vozila, omogućujući im da brže reagiraju i izbjegnu potencijalni sudar. Nadalje, DSRC u autonomnim vozilima omogućuje komunikaciju s vozilom i infrastrukturom (V2I – engl. *Vehicle-to-Infrastructure*) kao što je prikazano na slici 7 [24].



Slika 7. Primjer DSRC-a u gradskom okruženju [25]

Komuniciranjem s infrastrukturom na cesti koju čine semafori i prometni znakovi, autonomna vozila mogu dobiti informacije u stvarnom vremenu o prometnim uvjetima, zatvaračima cesta te drugim incidentima. Ove se informacije mogu koristiti za optimizaciju rute i brzine vozila, pritom osiguravajući da vozilo dođe na određeno mjesto sigurno i učinkovito [24].

3. RELEVANTNI SIMULACIJSKI PARAMETRI AUTONOMNE VOŽNJE

Istraživanje i kalibriranje mikrosimulacijskih modela datira još od 50-ih godina prošlog stoljeća, a sve kako bi se predstavilo i oponašalo ponašanje u vožnji, gdje modeli koji prate automobil predstavljaju glavnu komponentu. Neki od primjera modela praćenja automobila su Helly model, Gippsov model, model optimalne brzine (OMV), model izbjegavanja sudara (Camodel), model inteligentnog vozača (IDM, IDM+) itd. Mikrosimulacijsko modeliranje i modeli praćenja automobila naširoko se koriste za procjenu utjecaja rada autonomnih vozila, simulacije i vožnje.

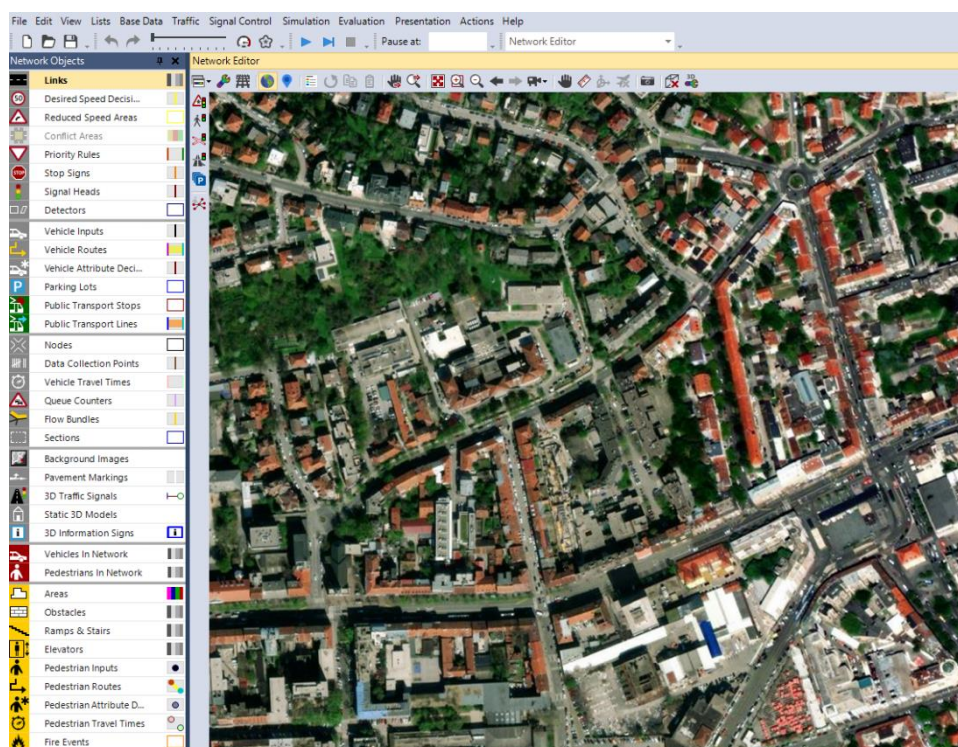
Mnogi istraživači su koristili različite oblike modela praćenja automobila kako bi procijenili njihov učinak na zagušenje. Sami pristupi modeliranju i parametri značajno su varirali od studije do studije [22]. Modeli prometne simulacije pokazuju stohastičnost budući da je prometni tok po prirodi stohastičan i dinamičan događaj. Takvi modeli koriste nasumične varijable i uzorke iz nasumičnih distribucija za demonstraciju radnje koju proizvode simulirane stavke mikroskopskih modela. Jedan od nedostataka takve radnje je da je potrebno višestruko pokretanje simulacije za prikupljanje izvršenih rezultata. Izvršavanje nekoliko pokreta simulacije te izračunavanje prosjeka njihovih rezultata pomiče samu kvalitetu rezultata prema očekivanim vrijednostima stvarnih distribucija [10]. Tj. odabire se odgovarajući broj ponavljanja s obzirom na razinu značajnosti željenih rezultata i dopuštenu postotnu pogrešku procjene [24].

3.1 PTV Vissim simulacijski alat

PTV Vissim je mikroskopski multimodalni softverski paket koji služi za simulaciju prometnog toka te je korišten u svrhu izrade ovoga rada. Razvijen je od strane njemačke softverske kompanije PTV Group, a po prvi puta se pojavljuje 1992. godine. Ime proizlazi iz “Verkehr In Städten – SIMulationsmodell” (njem. Promet u gradovima – simulacijski model). Opseg primjene seže od raznih pitanja prometnog inženjerstva, javnog prijevoza, urbanizma, zaštite od požara, pa sve do 3D vizualizacije za bolji prikaz te bolje prenošenje informacija [26]. Na slici 8 moguće je vidjeti prikaz sučelja PTV Vissim programskog alata u svrhu simulacije prometne situacije.

Funkcionalnosti PTV Vissim simulacijskog alata su:

- Modeliranje emisija prometa,
- Mikro i mezosimulacije,
- Simulacija prometa,
- Inteligentno upravljanje prometom,
- Simulacije autonomnih i povezanih vozila,
- Prioritizacija javnog prijevoza.



Slika 8. Prikaz sučelja PTV Vissim simulacijskog alata

PTV Vissim simulacijski alat omogućuje korisniku stvaranje potrebne prometne mreže, postavljanje parametara mreže poput duljine, prometnih pravila i sl., te definiranje količine i vrste prometa s ciljem dobivanja bitnih informacija o samom djelovanju prometa temeljem kojih se mogu istraživati i stvoriti nova optimalna rješenja za buduće bolje djelovanje prometa, te povećanje sigurnosti i doprinos ekološkim utjecajima prometa.

3.2 Simulacijski parametri autonomne vožnje

U svrhu simuliranja utjecaja autonomnih vozila na postojeću prometnu situaciju, potrebno je odrediti prema kojim parametrima se autonomno vozilo razlikuje od stvarnih vozača. Prije svega, samo autonomno vozilo možemo smatrati kao “idealnog” vozača gdje se samim time mora odrediti što takvog vozača čini. Idealan vozač, pa time i autonomno vozilo, mora imati sljedeće karakteristike:

- Izvrsno poznavanje zakona i pravila na cestama,
- Dobre sposobnosti prosuđivanja i donošenja odluka,
- Koncentraciju i dobru percepciju okoline,
- Strpljenje i učinkovitost,
- Tehničke vještine vožnje,
- Obrambene vještine vožnje, odnosno vještine sigurne vožnje i reagiranja na potencijalne opasnosti,
- Odgovoran stav.

Dok navedeni opis navodi karakteristike idealnog vozača, u samom programskom alatu PTV Vissim potrebno je autonomno vozilo definirati logikom vožnje i parametrima kojima bi se razlikovalo od skupine “realnih” vozača. Projektom CoEXist priloženi su opisi modeliranja autonomnih vozila u PTV Vissimu. CoEXist radi sa četiri temeljne logike vožnje opisane sa njihovim glavnim principima i sposobnostima, a to su [27]:

- Sigurno (engl. *Rail Safe*) - način vožnje koji opisuje determinističko ponašanje koje predstavlja zatvoreno, kontrolirano okruženje koje je moguće pronaći u tvornicama, lukama itd.,
- Oprezno (engl. *Cautious*) - način vožnje koji opisuje sigurnu vožnju,
- Normalno (engl. *Normal*) - vožnja koja opisuje način vožnje ljudskog vozača sa dodatnim kapacitetom mjerenja udaljenosti i brzine vozila u krugu senzora vozila,
- Sveznajuće (engl. *All-knowing*) - vozilo ima duboku svijest i mogućnosti predviđanja, što uglavnom dovodi do manjih praznina za sve manevre i situacije, u komercijalnoj verziji PTV Vissima naziva se *aggressive*.

Unutar softverskog alata PTV Vissim, od navedenih logika vožnje postoje *AV cautious*, *AV normal*, te *AV aggressive*. Isto tako, moguće je stvoriti i novu logiku bilo dupliciranjem i izmjenom postojećeg modela ili stvaranjem novog modela i proizvoljnim definiranjem

vrijednosti parametara. Skupine parametara koji služe za određivanje načina vožnje su: model slijeđenja vozila (engl. *Car following model*), promjena prometnog traka (engl. *Lane Change*), upravljanje signalnim planovima (engl. *Signal Control*), autonomna vožnja (engl. *Autonomous Driving*).

Model praćenja vozila (engl. *Car following model*), u PTV Vissimu ima dva seta parametara definiranih prema Wiedemannovom 74 i 99 modelu. U svrhu modeliranja autonomnih vozila koristi se Wiedemann 99 model zbog više mogućnosti izmjene ponašanja vozila. U samom modelu postoje parametri opisani u tablici 2 u nastavku.

Tablica 2. Vissim prometni parametri

Parametri	Opis	Mjerna jedinica []
CC0	Željena udaljenost između vozila	m
CC1	Razmak između vozila koje vozač želi održavati pri određenoj brzini (u sekundama)	s
CC2	Koliko se dopušta smanjenje udaljenosti u odnosu na željenu sigurnu udaljenost	m
CC3	Početak procesa usporavanja – broj sekundi prije postizanja sigurne udaljenosti	s
CC4	Negativna razlika u brzini	m/s
CC5	Pozitivna razlika u brzini	m/s
CC6	Utjecaj udaljenosti na oscilaciju brzine pri sljedećem postupku	1/(m*s)
CC7	Oscilacija tijekom ubrzavanja	m/s ²
CC8	Željeno ubrzanje od kad vozilo stoji	m/s ²
CC9	Željeno ubrzanje pri 80 km/h	m/s ²

U PTV Vissimu, za svaku od prijašnje navedenih logika vožnje ovi parametri su predefinirani, te je potrebno samo odabrati onaj koji odgovara potrebama simulacije. U slučaju potreba izmjena određenih parametara, sljedeća tablica daje generalne preporuke za postizanje željene logike vožnje te može služiti kao nacrt za bolje razumijevanje postavljanja vrijednosti parametara [27]. Unutar tablice 3, *zadano* označava prvotno zadanu vrijednost, *manje* smanjenje, dok *više* označava povećanje vrijednosti zadanog parametra.

Tablica 3. Parametri praćenja vozila

Parametar	Logika vožnje			
	Sigurno	Oprezno	Normalno	Sveznajuće
CC0	zadano	zadano	zadano	manje
CC1	Zadano/više	Zadano/više	zadano	manje
CC2	Zadano/više	Zadano/manje	manje	manje
CC3	Zadano/više	Zadano/više	zadano	zadano
CC4	manje	Zadano/manje	Zadano/manje	manje
CC5	manje	Zadano/manje	Zadano/manje	manje
CC6	Zadano/manje	Zadano/manje	zadano	manje
CC7	Zadano/manje	Zadano/manje	Zadano/manje	manje
CC8	manje	manje	zadano	zadano
CC9	manje	manje	zadano	zadano

Promjena trake (engl. *Lane change*) opisuje način i uvjete u kojima će vozilo promijeniti traku. Promjena trake može biti nužna ili slobodna. Nužna promjena trake je u slučaju potrebe praćenja rute vožnje, dok je slobodna promjena trake iz razloga boljih uvjeta vožnje. Moguće je definirati vrijednosti deceleracije vodećeg i pratećeg vozila, te je isto tako, ovisno o potrebama modela, moguće uključiti *Advanced merging* što omogućuje raniju promjenu trake u slučaju potreba te *Cooperative Lane Change*, kako bi se omogućila suradnja vozila prilikom promjena traka. *Cooperative Lane Change* služi za simuliranje povezanih autonomnih vozila. Tablicom 4 u nastavku daju se preporuke za različita ponašanja prilikom promjene trake [27].

Tablica 4. Parametri promjene trake

Logika vožnje	Oprezno		Normalno		Sveznajuće	
	Vodeće vozilo	Prateće vozilo	Vodeće vozilo	Prateće vozilo	Vodeće vozilo	Prateće vozilo
Maks. deceleracija	Manje/zadano	Manje/zadano	zadano	Manje/zadano	zadano	Više/zadano
- 1 m/s po udaljenosti	Manje/zadano	Manje/zadano	zadano	zadano	zadano	Manje/zadano
Prihvatljiva deceleracija	Manje/zadano	Manje/zadano	zadano	zadano	zadano	Više/zadano

Osim navedenog u tablici, za primjenu oprezne logike vožnje potrebno je uključiti opciju EABD (engl. *Enforce Absolute Breaking Distance*), odnosno nametanje apsolutne udaljenosti kočenja.

Upravljanje signalnim planovima (engl. *Signal control*), omogućuje postavljanje ponašanja vozila prilikom različitih oznaka semafora. Moguće je definirati ponašanje prilikom žutog signala semafora te ponašanje vozila prilikom crvenog/žutog signala. Također, bitno je definiranje čimbenika smanjenja sigurnosne udaljenosti na odgovarajući način. Vrijednost parametra je zadana na 0.6, dok se za autonomna vozila ovo može postaviti na 1 ako se očekuju nepromjenjive sigurnosne udaljenosti u blizini semaforiziranog raskrižja. U drugom slučaju, potrebno je postaviti vrijednost na manju od 1.









Autonomna vožnja (engl. *Autonomous driving*), je također opcija koja služi za postavljanje modela autonomnog vozila unutar simulacijskog alata PTV Vissim. Sastoji se od više opcija koje je moguće omogućiti ili isključiti za potrebe odgovarajućeg modela. Prva opcija je već prije navedena EABD, koja vozilu omogućava održavanje sigurne udaljenosti od vozila kako bi se isto moglo zaustaviti na vrijeme neovisno o brzini zaustavljanja vozila ispred. Sljedeća opcija je *Use implicit stochasticity*, koja koristi implicitnu stohastičnost, što omogućuje način vožnje koji priliči ljudskoj vožnji. Posljednja opcija naziva se *Platooning*. Ova opcija opisuje ponašanje povezanih vozila koja se zajedno kreću u vodu i imaju mogućnost bliske i sigurne vožnje pri velikim brzinama.

4. PRIKAZ ODABRANOG KORIDORA ZA ANALIZU UTJECAJA AUTONOMNIH VOZILA

Promatrano područje obuhvata se odnosi na raskrižja Ul. kralja Zvonimira-Rusanova ul., Ul. kralja Zvonimira-Šulekova ul., Ul. kralja Zvonimira-Dragojla Kušlana te Ul. kralja Zvonimira-Harambašićeva ulica locirana na istočnom dijelu grada Zagreba u gradskoj četvrti Maksimir. Ovaj koridor je odabran zbog svojih specifičnosti koje se očituju u odvojenosti prometa cestovnih vozila od vozila javnog gradskog prijevoza. U tom smislu izbjegnut je scenarij miješanja prometa, te dodatnog utjecaja vozila javnog gradskog prijevoza na ostali promet (uključujući autonomna vozila). Raskrižja su semaforizirana s pješačkim prijelazima te tim pravcem prolaze tramvajske linije 1, 17 i 9. Grafička podloga za izradu simulacijske prometne mreže preuzeta je sa Google Maps servisa. Za potrebe izrade prometne simulacije provedeno je ručno brojanje prometa na navedenim raskrižjima. Brojanje prometa provelo se radnim danom 9.3.2023. u popodnevnom vršnom satu između 16 i 17 sati u intervalima brojanja od 15 minuta.

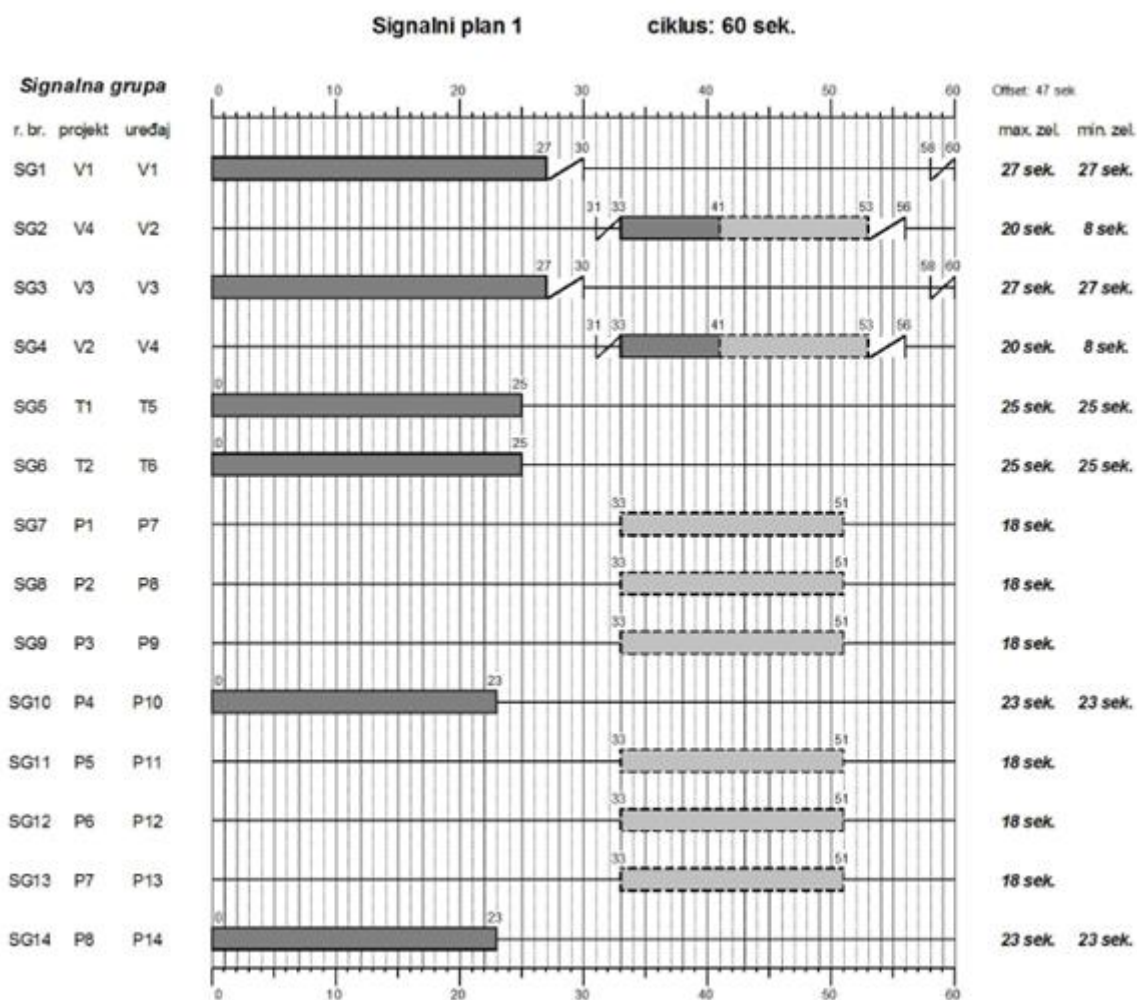
4.1 Analiza signalnog plana

Za promatrano područje izrađen je signalni plan semafora. Signalni plan predstavlja plan trajanja definiranih signalnih pojmova. Na slici 9 vidi se kojim su oznakama označeni simboli za minimalno zeleno, zeleno, treptanje zeleno, žuto, crveno, crveno-žuto, naredbu centrale, točku promjene programa i signalnu grupu.

	MINIMALNO ZELENO
	ZELENO
	TREPTANJE ZELENO
	ŽUTO
	CRVENO
	CRVENO - ŽUTO
	NAREDBA CENTRALE
	TOČKA PROMJENE PROGRAMA
Signalna grupa SG1	SIGNALNA GRUPA npr.1
V31	SIGNALNA GRUPA npr.31 (PO PROJEKTU)
V1	SIGNALNA GRUPA npr.31 (U UREĐAJU)

Slika 9. Legenda vremenskog prikaza izmjene signala

Signalni ciklus predstavlja vremenski period koji je potreban za obavljanje izmjene cijele sekvence određenih signalnih faza, odnosno ciklus označava vrijeme trajanja jednostrukog isteka definiranog signalnog plana. Trajanje signalnog ciklusa uvjetno je podijeljeno prema broju faza definiranih na jednom raskrižju sa semaforima. Signalna faza je definirana kao dio signalnog ciklusa u kojem određeni prometni tokovi imaju istodobno neometan prolaz, pri čemu je može činiti samo jedna ili više signalnih grupa. Signalni pojam definiran je kao prikaz stanja signalnog objekta odnosno semafora. Zakonom o sigurnosti cestovnog prometa definirani su sljedeći signalni pojmovi: crveno svjetlo, žuto svjetlo, zeleno svjetlo, crveno-žuto svjetlo te treptajuće žuto svjetlo. Zaštitno međuvrijeme je definirano kao razlika dviju konfliktnih signalnih grupa koje dolaze zaredom, te ovise o tri vremenske komponente: provozno vrijeme, vrijeme pražnjenja i vrijeme naleta. Na slici 10 prikazan je signalni plan raskrižja Ulice Kralja Zvonimira i Ulice Dragojla Kušlana.



Slika 10. Prikaz signalnog plana

Ciklus traje 60 sekundi i uključuje dvije faze. U prvoj fazi, V1 i V3 predstavljaju Ulicu kralja Zvonimira čije zeleno svjetlo traje 27 sekundi s tri sekunde žutog i jedne sekunde zaštitnog međuvremena. Također, u prvoj fazi 25 sekundi zelenog svjetla dodijeljeno je tramvajskom prometu koji prometuje u Zvonimirovoj ulici gdje pješaci dobivaju 23 sekunde zelenog svjetla za prelazak preko Kušlanove. Sveukupno, prva faza traje 31 sekundu, nakon čega se prelazi na drugu fazu koja počinje u tridesetprvoj sekundi ciklusa od šezdeset. Zatim, za signalne grupe V2 i V4 koje predstavljaju Kušlanovu ulicu počinje se s dvije sekunde žuto-crvenog svjetla. Također, za signalne grupe V2 i V4 pali se minimalno zeleno svjetlo u trajanju od osam sekundi s maksimalno dodijeljenih dvadeset sekundi za zeleno svjetlo ovisno o prometnoj potražnji. Također, u drugoj fazi 18 sekundi zelenog imaju pješaci za prelazak preko Zvonimirove, a to predstavljaju signalne grupe P1, P2, P3, P5, P6, P7.

4.2 Ul. kralja Zvonimira-Rusanova ulica

Raskrižje Ulice kralja Zvonimira i Rusanove ulice je četverokrako raskrižje u razini. Glavni prometni pravac je Ulica kralja Zvonimira koja se proteže od Trga žrtava fašizma sve do Harambašićeve ulice, dok je Rusanova sporedna ulica. Na tom raskrižju Zvonimirova ulica u oba smjera ima po dva prometna traka, gdje lijevi trak vodi dalje ravno po Zvonimirovoj, a desni omogućuje skretanje u Rusanovu te nastavak ravno po Zvonimirovoj. Lijevo skretanje iz Zvonimirove u Rusanovu nije moguće. Rusanova ulica je dvosmjerna ulica sa po jednim prometnim trakom za svaki smjer. Iz Rusanove je omogućeno skretanje lijevo i desno na pojedini tok Zvonimirove te nastavak ravno po Rusanovoj. Također, u Rusanovoj postoji uređeni parking paralelno uz prometnicu. U tablici 5 prikazano je brojanje prometa za raskrižje Ulice kralja Zvonimira i Rusanove ulice. Grafički prikaz prometnog opterećenja vidljiv je na digitalnoj ortofoto karti na slici 11.

Tablica 5. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Rusanova

1. Zvonimirova ulica - Rusanova ulica						
Vrijeme	Privoz Istok - Zvonimirova Ulica					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TT V	Automobil	TT V	Automobil	TT V
16:00 - 16:15	0	0	274	2	19	0
16:15 - 16:30	0	0	205	3	5	0
16:30 - 16:45	0	0	248	2	7	0
16:45 - 17:00	0	0	247	2	6	0
Ukupno	0	0	974	9	37	0
	0		983		37	
Vrijeme	privoz Jug - Rusanova ulica					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TT V	Automobil	TT V	Automobil	TT V
16:00 - 16:15	17	0	10	0	4	0
16:15 - 16:30	7	0	7	0	7	0
16:30 - 16:45	5	0	13	0	3	0
16:45 - 17:00	8	0	6	0	3	0
Ukupno	37	0	36	0	17	0
	37		36		17	
Vrijeme	privoz Zapad - Zvonimirova ulica					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TT V	Automobil	TT V	Automobil	TT V
16:00 - 16:15	0	0	230	6	19	0
16:15 - 16:30	0	0	203	1	24	0
16:30 - 16:45	0	0	264	2	29	0
16:45 - 17:00	0	0	205	1	27	0
Ukupno	0	0	902	10	99	0
	0		912		99	



Slika 11. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Rusanova

Tablični i grafički prikaz raskrižja prikazuje najveću zastupljenost prometa, odnosno najveći tok prometa u oba smjera Zvonimirove ulice, dok sporedna Rusanova ulica generira do oko 90 vozila po satu.

4.3 Ul. kralja Zvonimira-Šulekova ulica

Raskrižje Ulice kralja Zvonimira i Šulekove ulice je semaforizirano četverokrako raskrižje u razini. Glavna prometnica je Zvonimirova koja u svakom smjeru posjeduje dvije prometne trake, gdje je iz lijeve omogućen isključivo smjer kretanja ravno, dok je za desni prometni trak omogućeno desno skretanje u Šulekovu ulicu te nastavak ravno po Zvonimirovoj. Šulekova ulica je sporedna te posjeduje jedan prometni trak za pojedini smjer kretanja. Iz Šulekove ulice može se skrenuti lijevo ili desno na Zvonimirovu, te nastaviti ravno. Po pojedinom privozu Zvonimirove ulice prometuje od 900 do 1000 vozila po satu, dok po Šulekovoju prometuje od 50 do 100 vozila po satu po svakom privozu. Na signalnom planu na slici 15. može se uočiti kako signalne grupe V1 i V3, koje označavaju grupu cestovnih vozila koja se kreće po Zvonimirovoj ulici, dobivaju 27 sekundi zelenog svjetla, dok signalne grupe V2 i V4 koje označavaju cestovna vozila na Šulekovoju ulici dobivaju zeleno svjetlo minimalno 8 sekundi te maksimalno 20 sekundi. U nastavku, tablica 6 prikazuje opterećenje prometnih tokova dok slika 12 daje grafički prikaz prometnog opterećenja koristeći prikaz na digitalnoj ortofoto karti. Na slici 13 prikazan je položaj signalnih lanterni te smjer kretanja pojedinih signalnih grupa za raskrižje Zvonimirove i Šulekove ulice. Isto tako, slikom 14 prikazan je signalni plan za raskrižje Zvonimirove i Šulekove ulice.

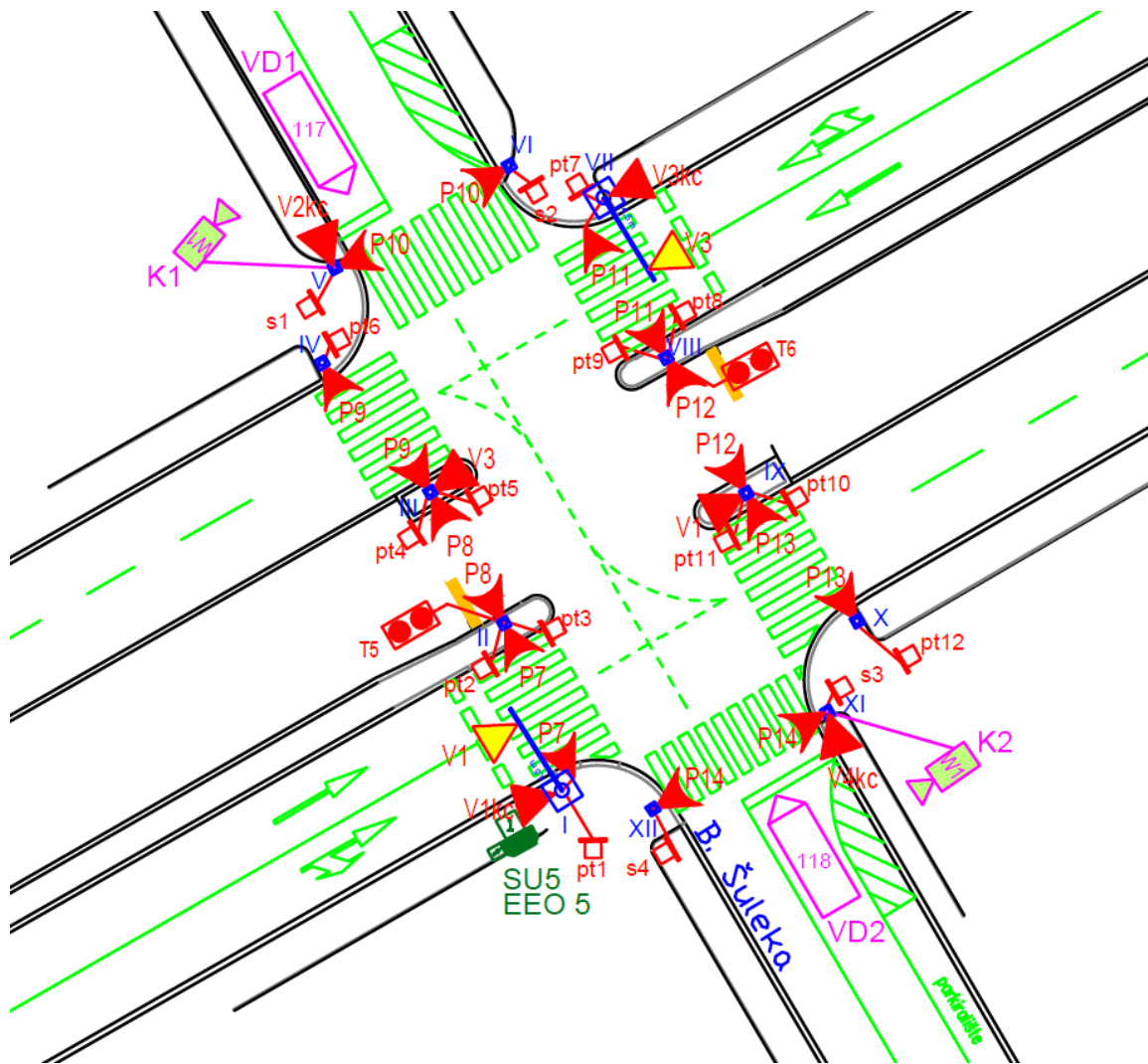
Tablica 6. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Šulekova

2. Zvonimirova ulica - Šulekova ulica						
Vrijeme	Privoz Sjever					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	3	0	4	0	5	0
16:15 - 16:30	4	0	4	0	4	0
16:30 - 16:45	2	0	8	0	6	0
16:45 - 17:00	5	0	7	0	4	0
Ukupno	14	0	23	0	19	0
	14		23		19	
Vrijeme	Privoz Istok					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	0	0	0	0	5	0
16:15 - 16:30	0	0	0	0	5	0
16:30 - 16:45	0	0	0	0	6	0
16:45 - 17:00	0	0	0	0	8	0
Ukupno	0	0	0	0	24	0
	0		0		48	
Vrijeme	privoz Jug					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	5	0	5	0	4	0
16:15 - 16:30	3	0	11	0	5	0
16:30 - 16:45	5	0	13	0	8	0
16:45 - 17:00	4	0	8	0	6	0
Ukupno	17	0	37	0	23	0
	34		74		46	
Vrijeme	privoz Zapad					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	0	0	0	0	15	0
16:15 - 16:30	0	0	0	0	10	0
16:30 - 16:45	0	0	0	0	8	0
16:45 - 17:00	0	0	0	0	10	0
Ukupno	0	0	0	0	0	0
	0		0		43	



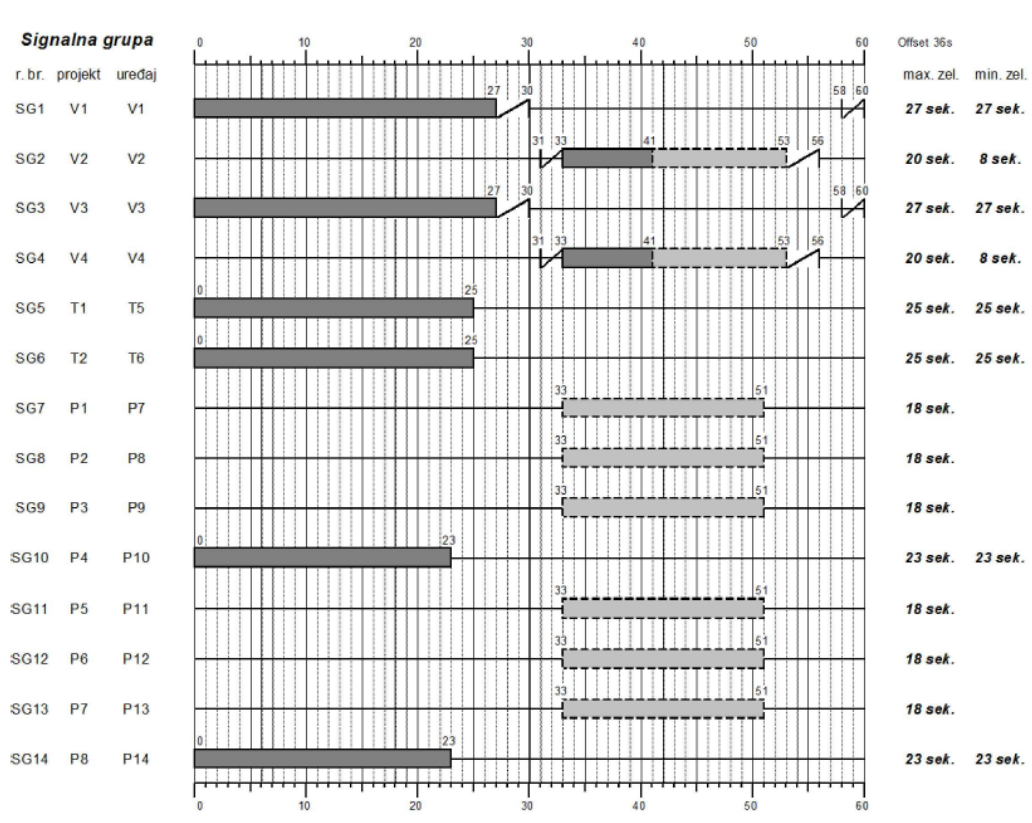
Slika 12. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Šulekova

Prema prikazanoj slici 12 ponavlja se najveći broj vozila na prometnim tokova u smjeru istoka i zapada Zvonimirove ulice. Kako je Šulekova ulica dvosmjerna na oba privoza, generira ponešto veći broj vozila nego Rusanova ulica.



Slika 13. Prikaz plana i položaja signala Zvonimirova-Šulekova

Navedeni prikaz plana i položaja signalnih lanterni služi kako bi se jasno utvrdio koji prometni tok se vodi kojom signalnom lanternom.



Slika 14. Signalni plan Zvonimirova-Šulekova

Signalni plan Zvonimirova-Šulekova ne sadrži nikakve razlike sa prikazanim signalnim planom Zvonimirova-Kušlanova prikazanim slikom 10.

4.4 Ul. kralja Zvonimira-Dragojla Kušlana

Ulica kralja Zvonimira i ulica Dragojla Kušlana formiraju četverokrako semaforizirano raskrižje u razini. Glavna prometnica je Zvonimirova koja u svakom smjeru posjeduje dvije prometne trake, gdje je iz lijeve omogućen isključivo smjer kretanja ravno, dok je za desni prometni trak omogućeno desno skretanje u Ulicu Dragojla Kušlana te nastavak ravno po Zvonimirovoj. Kušlanova ulica je sporedna te posjeduje jedan prometni trak za pojedini smjer kretanja. Iz Kušlanove ulice može se skrenuti lijevo ili desno na Zvonimirovu, te se može nastaviti ravno. Također, omogućeno je parkiranje paralelno uz prometnu traku u oba smjera Kušlanove. Grafički prikaz prometnog opterećenja vidljiv je na digitalnoj ortofoto karti na slici 15, dok tablica 7 prikazuje prometne tokove raskrižja. Na slici 16 prikazan je položaj signalnih lanterna te smjer kretanja pojedinih signalnih grupa za raskrižje Zvonimirove i Harambašićeve ulice. Na slici 17 prikazan je signalni plan za raskrižje Zvonimirove i Kušlanove ulice.

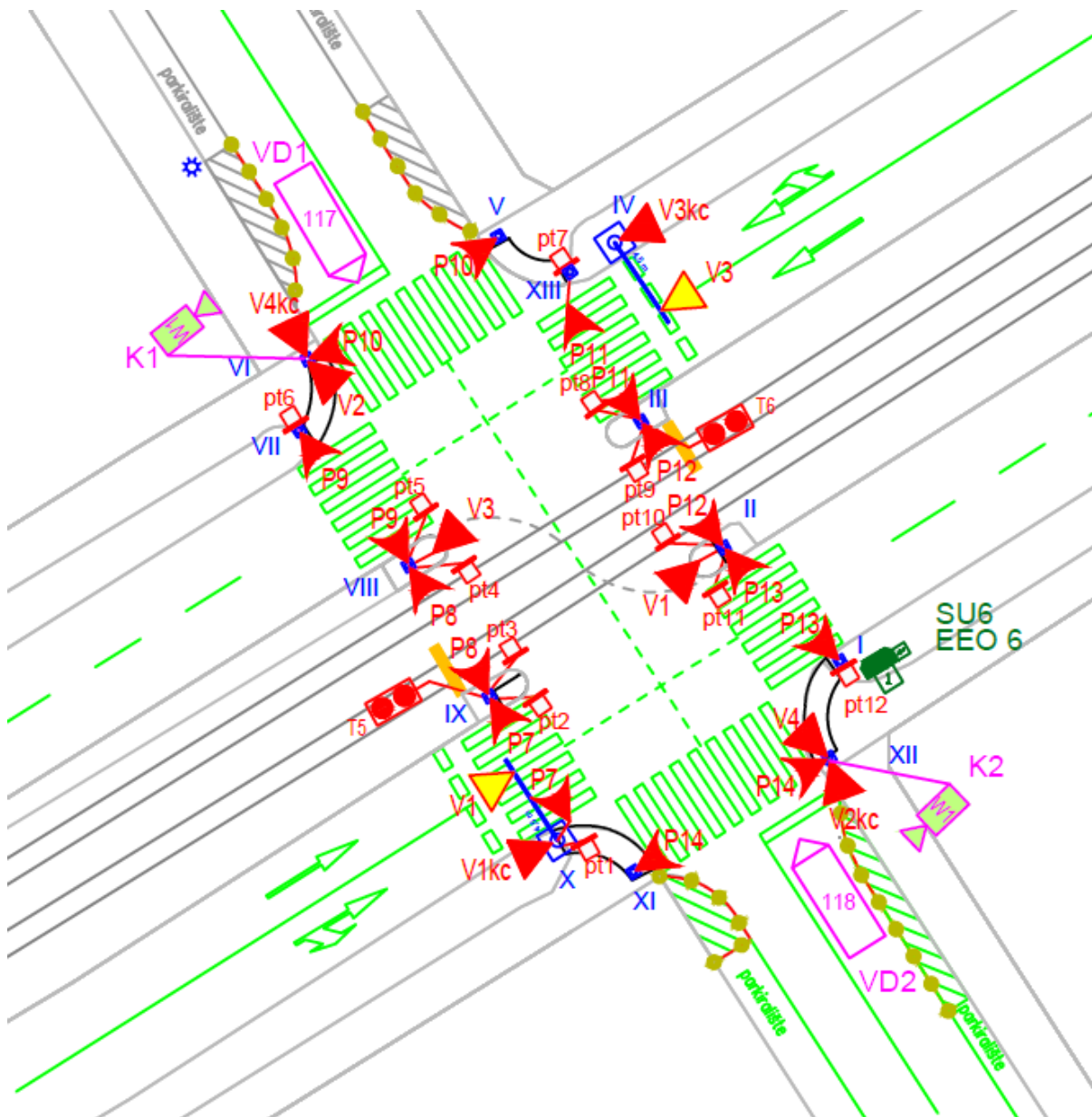
Tablica 7. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Kušlanova

3. Zvonimirova ulica - ulica Dragojla Kušlana						
Vrijeme	Privoz Sjever					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	2	0	5	0	4	0
16:15 - 16:30	3	0	5	0	5	0
16:30 - 16:45	3	0	9	0	7	0
16:45 - 17:00	2	0	6	0	2	0
Ukupno	10	0	25	0	18	0
	10		25		18	
Vrijeme	Privoz Istok					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	0	0	0	0	4	0
16:15 - 16:30	0	0	0	0	4	0
16:30 - 16:45	0	0	0	0	8	0
16:45 - 17:00	0	0	0	0	8	0
Ukupno	0	0	0	0	24	0
	0		0		24	
Vrijeme	privoz Jug					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	6	0	3	0	6	0
16:15 - 16:30	0	0	12	0	5	0
16:30 - 16:45	6	0	13	0	8	0
16:45 - 17:00	3	0	9	0	4	0
Ukupno	15	0	37	0	23	0
	15		37		23	
Vrijeme	privoz Zapad					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	0	0	0	0	17	0
16:15 - 16:30	0	0	0	0	8	0
16:30 - 16:45	0	0	0	0	5	0
16:45 - 17:00	0	0	0	0	12	0
Ukupno	0	0	0	0	42	0
	0		0		42	

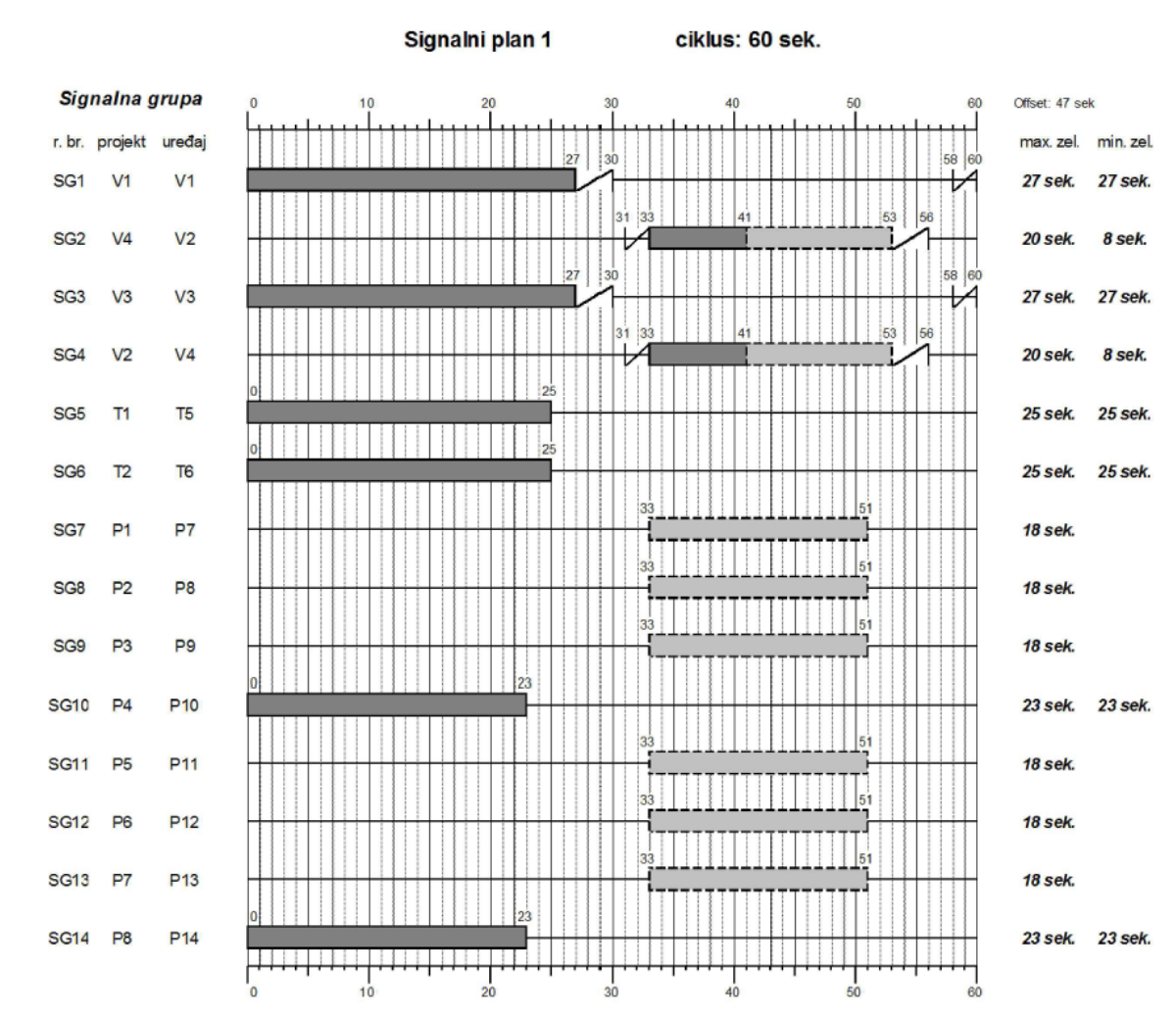


Slika 15. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Kušlanova

Prikaz raspodjele prometnih tokova slikom 15 prikazuje najveći broj vozila u oba smjera Zvonimirove ulice. Vozila sa sjevernog privoza Kušlanove ulice velikim postotkom se priključuju na Zvonimirovu u smjeru zapada.



Slika 16. Prikaz plana i položaja signala Zvonimirova-Kušlanova



Slika 17. Signalni plan Zvonimirova-Kušlanova

Ciklus trajanja signalnog plana Zvonimirova-Kušlanova iznosi 60 sekundi, gdje je prioritet postavljen za puštanje vozila Zvonimirove ulice.

4.5 Ul. kralja Zvonimira-Harambašićeva ulica

Raskrižje Ulice kralja Zvonimira i Harambašićeve ulice najveće je promatrano raskrižje u ovome radu. Također se radi o četverokrakom semaforiziranom raskrižju. Kao i kod prethodnih raskrižja, skretanje iz Zvonimirove lijevo u Harambašićevu nije moguće, dok se ostali tokovi odvijaju nesmetano. Prometni tokovi raskrižja iskazani su u tablici 8. Grafički prikaz prometnog opterećenja vidljiv je na digitalnoj ortofoto karti na slici 18. Na slici 19 prikazani su položaji signalnih lanterna, dok je na slici 20 prikazan signalni plan za raskrižje Zvonimirove i Harambašićeve ulice.

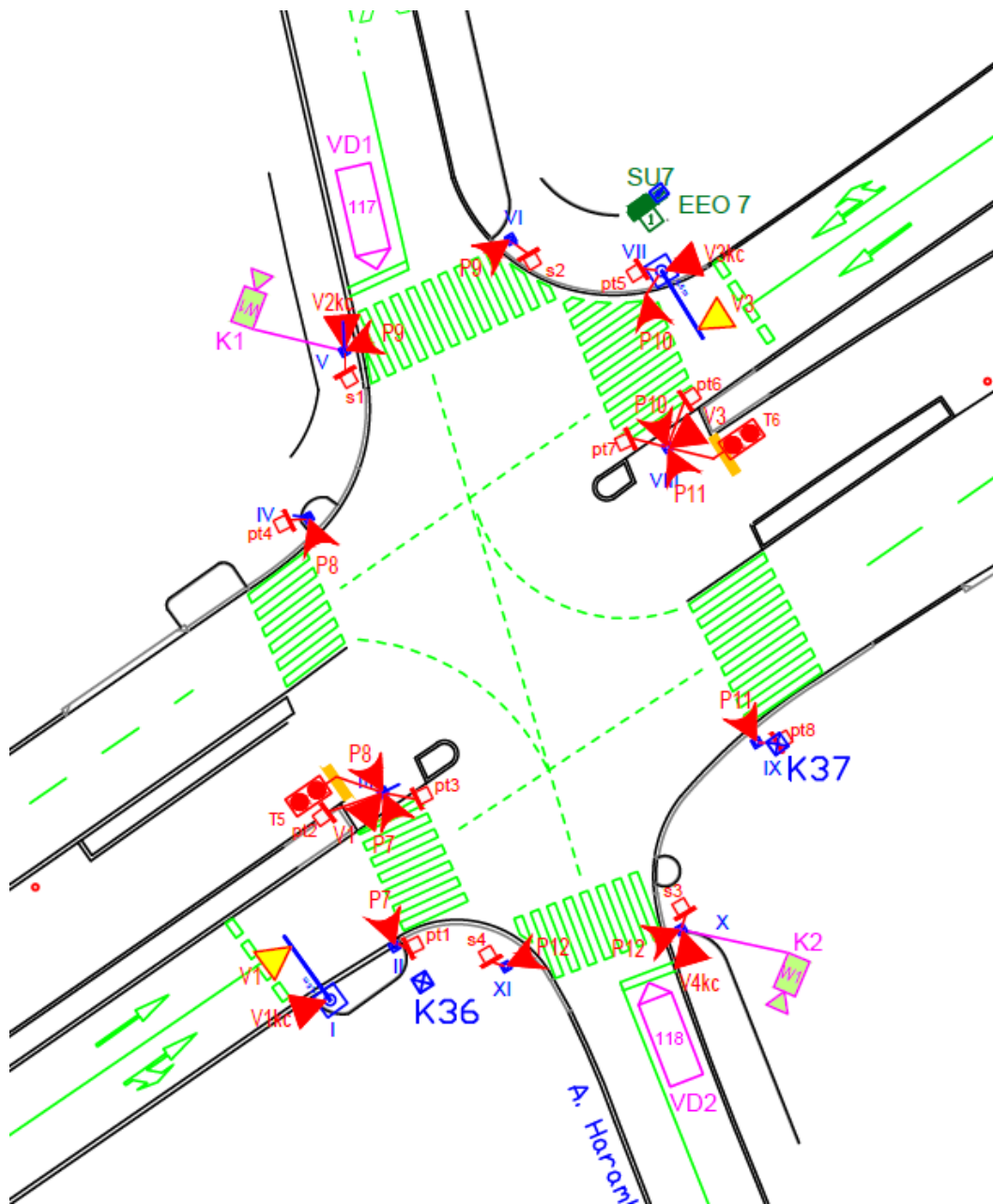
Tablica 8. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Harambašićeva

4. Zvonimirova ulica - Harambašićeva ulica						
Vrijeme	Privoz Sjever - Harambašićeva					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	52	2	14	1	35	2
16:15 - 16:30	47	2	18	1	36	0
16:30 - 16:45	49	3	12	0	36	3
16:45 - 17:00	29	1	17	0	32	1
Ukupno	177	8	61	2	139	6
	185		63		145	
Vrijeme	Privoz Istok - Zvonimirova					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	0	0	120	0	49	0
16:15 - 16:30	0	0	153	0	35	0
16:30 - 16:45	0	0	150	0	35	0
16:45 - 17:00	0	0	160	0	35	0
Ukupno	0	0	583	0	154	0
	0		583		154	
Vrijeme	privoz Jug - Harambašićeva					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	9	1	18	2	19	3
16:15 - 16:30	3	0	15	1	17	2
16:30 - 16:45	8	1	25	0	23	0
16:45 - 17:00	5	0	17	1	20	1
Ukupno	25	2	75	4	79	6
	27		79		85	
Vrijeme	privoz Zapad - Zvonimirova					
	Lijevo		Ravno		Desno	
	Automobil	TTV	Automobil	TTV	Automobil	TTV
16:00 - 16:15	0	0	269	3	11	0
16:15 - 16:30	0	0	226	1	12	0
16:30 - 16:45	0	0	220	0	11	0
16:45 - 17:00	0	0	223	1	12	0
Ukupno	0	0	938	5	46	0
	0		943		46	

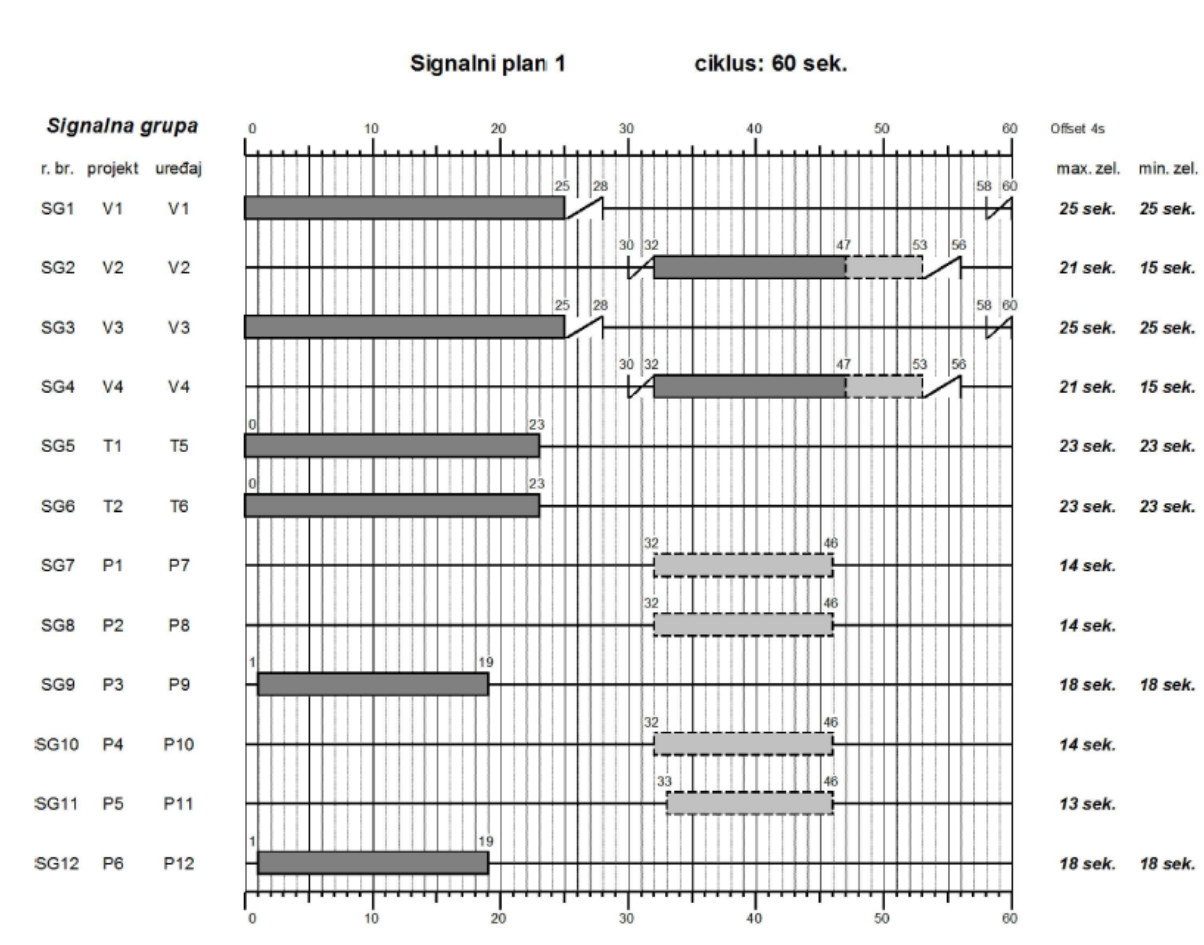


Slika 18. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Harambašićeva

Kako je navedeno na prijašnjim raskrižjima, najopterećeniji prometni tokovi raskrižja Zvonimirova-Harambašićeva su na Zvonimirovoj ulici u oba smjera. Prometni tok sporednih privoza sastoji se od nešto većeg broja vozila nego na ostalim navedenim raskrižjima, dok je južni privoz zastupljeniji od sjeverno privoza Harambašićeve.



Slika 19. Prikaz plana i položaja signala Zvonimirova-Harambašićeva



Slika 20. Signalni plan Zvonimirova-Harambašićeva

Kao i na prijašnjim raskrižjima, signalni plan Zvonimirova-Harambašićeva nema nikakvih razlika. Na cijeloj promatranoj dionici Zvonimirove ulice, odnosno svih promatranih raskrižja koristi se isti signalni plan kako bi se dobio sinkronizirani protok vozila.

4.6 Prikaz odabranog koridora za analizu utjecaja autonomnih vozila

Korištenjem mikrosimulacijskog alata PTV Vissim stvoren je novi projekt. Pokretanjem alata dobiven je kartografski prikaz svijeta na kojem izrađujemo željeni model. U slučaju ovog rada, model se radio na dionici Zvonimirove, od raskrižja sa Rusanovom ulicom pa sve do raskrižja sa Harambašićevom ulicom. U prvom koraku, bilo je potrebno kreirati linkove (eng. *Links*, slika 21), odnosno prometnu mrežu koja se promatra. U ovom slučaju promatrala su se četiri raskrižja: Ul. kralja Zvonimira-Rusanova ul., Ul. kralja Zvonimira-Šulekova ul., Ul. kralja Zvonimira-Dragojla Kušlana te Ul. kralja Zvonimira-Harambašićeva ulica. Svaki link ima određene parametre koje je potrebno urediti, poput: naziva, širina prometne trake, broja prometnih traka te broja traka u suprotnom smjeru.

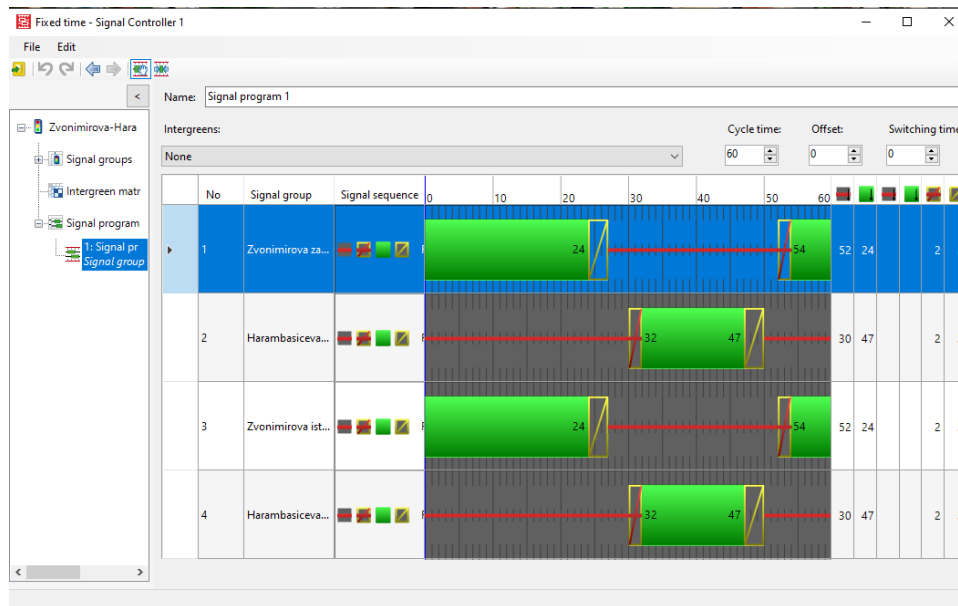


Slika 21. Prikaz stvorenih linkova

Kada su postavljeni svi linkovi te je kreirana željena prometna mreža, bilo je potrebno definirati pravila za vođenje prometa. Prvi segment su područja reducirane brzine (eng. *Reduced Speed Areas*) koja definiraju određene segmente linkova, tj. prometnica gdje prilikom skretanja sva vozila kreću usporeno. Postavljeni parametri su: dužina područja za usporenje i brzina kojom se vozila kreću tom dužinom. Ukoliko se taj segment ne definira, vozila bi se kretala neprirodnom brzinom. Brzina koja je definirana je 12 km/h.

Prometna mreža koja je kreirana ima određene konfliktne točke (eng. *Conflict Areas*). Sva raskrižja su semaforizirana, ali zbog konflikata potrebno je definirati koje vozilo ima prednost. Pravilo koje se primjenjuje u tom slučaju je pravilo suprotnog smjera gdje vozilo koje zadržava smjer kretanja ima prednost nad vozilom suprotnog smjera koje skreće. To pravilo je definirano u skladu sa Zakonom o sigurnosti prometa na cestama, članak 57. [28].

Nadalje, postavljeni su semafori i njihovi pripadajući signalni planovi. Signalni plan svakog semafora je postavljen prema trenutnoj prometnoj signalizaciji opisanoj u poglavlju 4.1. Definiranjem signalnih planova postavljaju se semafori sa svojim pripadajućim signalnim planom. U nastavku, slika 22 prikazuje izrađeni signalni plan.



Slika 22. Signalni plan u simulaciji

Nakon signalnih planova, potrebno je napraviti kompoziciju vozila (eng. *Vehicle composition*) kojim su se definirale skupine vozila za pojedine dionice cesta. To je određeno na način da su određeni omjeri pojave određene vrste vozila u odnosu na cjelokupni broj vozila izbrojanih u jednom satu. Zatim je bilo potrebno definirati unos vozila (eng. *Vehicle input*) za svaki privoz izrađenog modela. Na primjer, na privozu Harambašićeva Sjever izbrojeno je 377 vozila u jednom satu. Nakon unosa broja vozila potrebno je definirati sva moguća kretanja vozila cijelom prometnom mrežom te im pridijeliti odgovarajući broj vozila koji su određeni brojanjem prometa (eng. *Vehicle routes*).

Na definiranoj dionici postoji segment Javnog gradskog prijevoza (JGP-a) gdje je potrebno definirati položaj infrastrukture od tračnica do stajališta JGP-a. U programskom alatu PTV Vissim, pomoću opcije stajališta javnog prijevoza (eng. *Public transport stop*) moguće je definirati naziv lokacija te duljinu stanica JGP-a. Isto tako, potrebno je definirati linije javnog prijevoza (eng. *Public transport lines*) te njima pridodati naziv linije. Uz to, potrebno je odrediti o kojoj vrsti JGP-a se radi, brzina kojom se kreće, kojom rutom prolazi te raspored vremena polaska. Pravila vožnje tipa vozila javnog prijevoza određuju se kroz PT parametre. Određuju se kapacitet vozila JGP-a, vrijeme stajanja na stanici, vrijeme ukrcanja putnika itd.

Za potrebe prikupljanja detaljnih parametara koji će se koristiti za analizu simulacije u odnosu na omjer autonomnih vozila, definirana su područja raskrižja (engl. *Nodes*), točke prikupljanja podataka (engl. *Data Collection Points*) te područje izmjere vremena putovanja (eng. *Vehicle Travel Times*).

Nakon definiranja svih prethodno navedenih parametara, moguće je pokrenuti simulaciju te dobiti podatke za analizu prometne situacije sa 0% autonomnih vozila u sustavu. Kako bi se pridodao određeni postotak autonomnih vozila, potrebno je stvoriti novi tip vozila (eng. *Vehicle Type*), te definirati omjer autonomnih vozila u odnosu na ukupni broj vozila. Također, potrebno je odabrati logiku vožnje kojom će se autonomna vozila voditi u simulaciji. U svrhu analize podataka izrađeni su scenariji simulacijskih modela sa omjerima 25%, 50%, 75% i 100% autonomnih vozila u ukupnom prometu.

5. SCENARIJI UDJELA AUTONOMNIH VOZILA NA PROMATRAMOM KORIDORU

Za potrebe dobivanja korisnih i relevantnih podataka koji će dati jasnu sliku utjecaja autonomnih vozila izvedene su simulacije s 0%, 25%, 50%, 75% i 100% udjela autonomnih vozila u sveukupnom prometnom opterećenju simulacije. Postotak udjela je jednomjerno raspodijeljen po prometnim tokovima svakog raskrižja na promatranj dionici Zvonimirove ulice. U nastavku iskazane su tablice sa pripadajućim vrijednostima svakog scenarija te je provedena analiza, odnosno usporedba svih podataka.

5.1 Simulacija postojećeg stanja bez autonomnih vozila u prometnoj mreži

Prva provedena simulacija sadrži 0% autonomnih vozila, gdje su vozila vođena po već definiranom modelu vožnje *Urban (motorized)* koji koristi implicitnu stohastiku kako bi se postigao realan prikaz prometovanja prometnom mrežom. Simulacija bi trebala dati prikaz sličan onomu viđenom u stvarnom svijetu. Kako ne postoji udio autonomnih vozila, koristi se Wiedemannov 74 Car-following model koji definira logiku vožnje. U nastavku su priložene tablice s relevantnim podacima dobivenim iz provedenih simulacija. Svi rezultati sadrže prosječnu vrijednost više provedenih simulacija. Tablica 9 daje vrijednosti vremena putovanja kroz određena raskrižja Zvonimirove ulice u oba smjera te vrijeme putovanja vozila kroz cijelu dionicu Zvonimirove ulice.

Tablica 9. Vrijeme putovanja vozila za 0% autonomnih vozila

Promatrana dionica	Broj vozila	Vrijeme putovanja [s]	Prijedena udaljenost [m]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	147	12.03	125.88
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	101	13.34	126.04
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	133	12.48	154.33
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	106	13.46	155.92
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	126	10.04	121.22
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	111	9.98	116.4
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	118	14.51	128.66
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	109	14.1	128.59
9. Zvonimirova Zapad-Istok	110	62.72	755.6
10. Zvonimirova Istok-Zapad	95	64.56	737.32

Tablicom je prikazano kako je za prolazak cijelom Zvonimirovom ulicom potrebno 64 sekunde u prosjeku, dok se za raskrižje Harambašićeva i Zvonimirova zahtijeva najviše vremena za prolazak raskrižjem. Razlog je što se na spomenutom raskrižju nalazi najveći broja vozila.

Nadalje, tablica 10 opisuje razinu usluge svih promatranih raskrižja, te podatke bitne za ekološku analizu, kao što su potrošnja goriva i zagađenje zraka ispušnim plinovima poput CO, NOX i štetnih čestica VOC (engl. *Volatile organic compounds*). Razina usluge raskrižja Zvonimirova - Harambašićeva je B, dok je za ostala raskrižja. Ta ocjena prikazuje prosječnu ocjenu svih privoza za svako pojedino raskrižje. Uzorak pokazuje kako je razina usluge niža na sporednim privozima što proizlazi iz toga da se prioritet stavlja na Zvonimirovu.

Tablica 10. Čvorovi za 0% autonomnih vozila

Dionica	Zvonimirova - Rusanova	Zvonimirova - Šulekova	Zvonimirova - Kušlanova	Zvonimirova - harambašićev
Duljina kolone (broj vozila)	1.62	2.34	1.6	7.11
Broj vozila	288	277	287	323
Razina usluge	A	A	A	B
Kašnjenje [s]	5.93	4.87	4.62	12.79
Kašnjenje zbog zaustavljanja [s]	2.39	2.27	2.68	7.32
CO [g]	140.76	124.276	119.334	223.695
NOX [g]	27.387	24.18	23.218	43.523
VOC [g]	32.623	28.802	27.657	51.844
Potrošnja [gal]	2.014	1.778	1.707	3.2

Rezultatima se pokazalo kako je raskrižje Zvonimirove i Harambašićeve ulice najopterećenije, sa najmanjom ocjenom razine usluge B, najduljom kolonom vozila te najdužim kašnjenjem u usporedbi s ostalima. Ocjene razine usluge propisane su prema HCM-u (engl. *Highway Capacity Manual*) te su prikazane tablicom 11.

Tablica 11. Razina usluge za 0% autonomnih vozila

Razina usluge	Prosječno kašnjenje [s/voz]
A	10
B	>10 i 20
C	>20 i 35
D	>35 i 55
E	>55 i 80
F	>80

Isto se pokazuje i sa ekološkim učincima, gdje su emisije plinova i čestica skoro pa dvaput više od ostalih. Isto tako, tablica 12 u nastavku prikazuje prosječne harmonijske i aritmetičke brzine vozila na određenoj dionici mreže te zauzeće.

Tablica 12. Točke za prikupljanje podataka za 0% autonomnih vozila

Privoz	Broj vozila	Prosječna aritmetička brzina [km/h]	Prosječna harmonijska brzina [km/h]	Zauzeće [%]
Zvonimirova-Rusanova Zapad	165	42.19	10.22	0.147
Zvonimirova-Rusanova Istok	106	43.48	18.3	0.2731
Zvonimirova-Rusanova Jug	13	11.75	7.41	0.2773
Zvonimirova-Šulekova Zapad	142	48.59	10.3	0.1471
Zvonimirova-Šulekova Istok	114	46.25	19.26	0.2705
Zvonimirova-Šulekova Jug	7	10.35	1.74	0.1209
Zvonimirova-Šulekova Sjever	7	10.52	5.41	0.0143
Zvonimirova-Kušlanova Zapad	135	48.19	7.18	0.1973
Zvonimirova-Kušlanova Istok	122	49.57	19.77	0.1817
Zvonimirova-Kušlanova Jug	15	10.07	4.28	0.3533
Zvonimirova-Kušlanova Sjever	10	11.03	3.71	0.3008
Zvonimirova-Harambašićeva Zapad	129	43.86	20.35	0.4004
Zvonimirova-Harambašićeva Istok	135	36.16	16.65	0.3894
Zvonimirova-Harambašićeva Jug	17	14.94	6.36	0.3157
Zvonimirova-Harambašićeva Sjever	47	12.41	4.46	0.7088

Formule za izračun prosječne aritmetičke i harmonijske brzine su:

- Prosječna aritmetička brzina

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

- Prosječna harmonijske brzina

$$\bar{x} = n \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

Gdje je:

\bar{x} - Prosječna aritmetička i harmonijska brzina.

n - Broj brzina.

$x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n$ - Zbroj vrijednosti brzina.

Zauzeće (eng. *Occupancy*) prometnice predstavlja postotak vremena na promatranom dijelu ceste gdje je dionica zauzeta vozilima, ili ukupno vrijeme boravka vozila u zoni detekcije u promatranom intervalu (%).

Na kraju slijedi tablica 13 koja prikazuje prikupljene podatke o kašnjenju na svakoj dionici Zvonimirove ulice. Tablica sadrži podatke o prosječnom zaustavnom kašnjenju, prosječnom broju zaustavljanja po vozilu te prosječnom kašnjenju svih vozila.

Tablica 13. Rezultati kašnjenja za 0% autonomnih vozila

Dionica	Prosječno zaustavljeno kašnjenje [s]	Prosječni broj zaustavljanja po vozilu [%]	Prosječno kašnjenje svih vozila [s]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	1.43	0.22	4.79
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	2.72	0.36	6.15
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	1.53	0.2	3.49
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	1.95	0.25	4.54
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	1.14	0.13	2.88
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	1.59	0.16	3.33
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	4.06	0.25	6.9
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	2.97	0.34	6.73

Kašnjenje predstavlja dodatno vrijeme zbog nepotrebnog zaustavljanja trenutnog broja vozila koja voze reduciranom brzinom. Razlika stvarnog putovanja i idealnog putovanja daje kašnjenje.

5.2 Simulacija s 25% udjela autonomnih vozila

Kao i u prethodnom poglavlju, za simulaciju sa udjelom vozila od 25% izvučene su tablice sa istim sadržajima. Prva tablica, tj. tablica 14, prikazuje vrijeme putovanja kroz dionicu Zvonimirove.

Tablica 14. Vrijeme putovanja vozila za 25% autonomnih vozila

Promatrana dionica	Broj vozila	Vrijeme putovanja [s]	Prijedena udaljenost [m]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	147	12,47	125,88
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	103	14,05	126,04
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	135	13,28	154,33
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	107	13,36	155,92
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	127	10,57	121,22
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	112	10,85	116,4
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	115	16,68	128,66
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	109	15,06	128,59
9. Zvonimirova Zapad-Istok	108	67,52	755,6
10. Zvonimirova Istok-Zapad	93	67,91	737,32

Prikazano je kako je za prolazak cijelom Zvonimirovom ulicom u prosjeku potrebno 67 sekundi, dok se za raskrižje Harambašićeva i Zvonimirova zahtijeva najviše vremena za prolazak raskrižjem. Nadalje, tablica 15 opisuje kvalitetu svih promatranih raskrižja, te potrošnju goriva i zagađenje zraka ispušnim plinovima kao što su CO, NOX, VOC (engl. *Volatile organic compounds*).

Tablica 15. Čvorori za 25% autonomnih vozila

Dionica	Zvonimirova - Rusanova	Zvonimirova - Šulekova	Zvonimirova - Kušlanova	Zvonimirova - harambašićeva
Duljina kolone (broj vozila)	1,63	2,38	1,6	6,6
Broj vozila	289	278	289	329
Razina usluge	A	A	A	B
Kašnjenje	6,13	4,89	4,92	13,03
Kašnjenje zbog zaustavljanja [s]	2,35	2,14	2,73	7,1
CO [g]	146,144	124,377	124,69	233,151
NOX [g]	28,434	24,199	24,26	45,363
VOC [g]	33,8	28,826	28,898	54,035
Potrošnja [gal]	2,091	1,779	1,784	3,335

Na kraju, tablica 16 prikazuje prosječne brzine i zauzeće svake dionice, dok tablica 17 u nastavku prikazuje kašnjenja na raskrižjima.

Tablica 16. Točke za prikupljanje podataka za 25% autonomnih vozila

Privoz	Broj vozila	Prosječna aritmetička brzina [km/h]	Prosječna harmoniska brzina [km/h]	Zauzeće [%]
Zvonimirova-Rusanova Zapad	165	40,42	11,88	16,16
Zvonimirova-Rusanova Istok	108	39,75	17,42	24,12
Zvonimirova-Rusanova Jug	13	12,09	7,61	27,75
Zvonimirova-Šulekova Zapad	142	46,17	6,43	18,93
Zvonimirova-Šulekova Istok	115	44,51	20,77	23,86
Zvonimirova-Šulekova Jug	7	10,25	1,5	18,51
Zvonimirova-Šulekova Sjever	7	10,03	5,54	1,44
Zvonimirova-Kušlanova Zapad	137	45,18	7,92	21,00
Zvonimirova-Kušlanova Istok	122	46,37	15,52	21,06
Zvonimirova-Kušlanova Jug	15	10,06	4,55	35,44
Zvonimirova-Kušlanova Sjever	10	10,96	3,76	30,08
Zvonimirova-Harambašićeva Zapad	128	39,28	20,12	41,01
Zvonimirova-Harambašićeva Istok	136	34,04	15,92	42,79
Zvonimirova-Harambašićeva Jug	17	18	7,31	30,80
Zvonimirova-Harambašićeva Sjever	49	13,32	5,81	64,72

Tablica 17. Rezultati kašnjenja za 25% autonomnih vozila

Dionica	Prosječno zaustavljeno kašnjenje [s]	Prosječni broj zaustavljanja po vozilu [%]	Prosječno kašnjenje svih vozila [s]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	1,38	0,24	4,77
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	2,64	0,45	6,49
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	1,57	0,23	3,74
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	1,46	0,22	3,98
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	1,13	0,16	3,02
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	1,8	0,2	3,85
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	5,25	0,34	8,65
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	3,07	0,38	7,34

5.3 Simulacija s 50% udjela autonomnih vozila

Za simulaciju sa udjelom od 50% autonomnih vozila priložene su sljedeće tablice koje iskazuju podatke o vremenu putovanja (tablica 18), razini usluge (tablica 19), ekološkim parametrima i brzini vozila (tablica 20) te kašnjenju na raskrižjima (tablica 21).

Tablica 18. Vrijeme putovanja vozila za 50% autonomnih vozila

Promatrana dionica	Broj vozila	Vrijeme putovanja [s]	Prijeđena udaljenost [m]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	147	12.45	125.88
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	104	14.65	126.04
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	135	13.52	154.33
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	108	14.28	155.92
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	129	10.98	121.22
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	114	10.66	116.4
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	116	17.96	128.66
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	109	14.66	128.59
9. Zvonimirova Zapad-Istok	107	70.02	755.6
10. Zvonimirova Istok-Zapad	93	69.38	737.32

Tablica 19. Čvorovi za 50% autonomnih vozila

Dionica	Zvonimirova - Rusanova	Zvonimirova - Šulekova	Zvonimirova - Kušlanova	Zvonimirova - Harambašićeva
Duljina kolone (broj vozila)	1.56	2.38	1.5	5.58
Broj vozila	291	279	291	330
Razina usluge	A	A	A	B
Kašnjenje	5.92	5.06	4.8	11.76
Kašnjenje zbog zaustavljanja [s]	2.35	2.23	2.67	6.25
CO [g]	145.986	125.052	124.25	217.593
NOX [g]	28.404	24.331	24.174	42.336
VOC [g]	33.834	28.982	28.796	50.429
Potrošnja [gal]	2.089	1.789	1.778	3.113

Tablica 20. Točke za prikupljanje podataka za 50% autonomnih vozila

Privoz	Broj vozila	Prosječna aritmetička brzina [km/h]	Prosječna harmoniska brzina [km/h]	Zauzeće [%]
Zvonimirova-Rusanova Zapad	165	39.36	10.74	13.89
Zvonimirova-Rusanova Istok	109	37.88	17.14	25.75
Zvonimirova-Rusanova Jug	13	13.83	7.73	27.6
Zvonimirova-Šulekova Zapad	142	44.01	5.25	19.53
Zvonimirova-Šulekova Istok	116	43.25	20.32	25.06
Zvonimirova-Šulekova Jug	7	11.34	1.54	18.35
Zvonimirova-Šulekova Sjever	7	10.16	5.72	1.43
Zvonimirova-Kušlanova Zapad	137	43.61	8.31	12.08
Zvonimirova-Kušlanova Istok	124	45.75	19.66	18.21
Zvonimirova-Kušlanova Jug	15	10.65	4.76	35.3
Zvonimirova-Kušlanova Sjever	10	11.22	4.1	30.03
Zvonimirova-Harambašićeva Zapad	131	36.35	18.79	42.04
Zvonimirova-Harambašićeva Istok	135	35.23	16.93	42.38
Zvonimirova-Harambašićeva Jug	17	17.81	7.28	30.98
Zvonimirova-Harambašićeva Sjever	52	16.22	5.44	58.03

Tablica 21. Rezultati kašnjenja za 50% autonomnih vozila

Dionica	Prosječno zaustavljeno kašnjenje [s]	Prosječni broj zaustavljanja po vozilu [%]	Prosječno kašnjenje svih vozila [s]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	1.26	0.25	4.4
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	2.88	0.49	6.7
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	1.46	0.21	3.54
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	1.82	0.27	4.45
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	1.19	0.16	3.04
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	1.48	0.2	3.3
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	5.85	0.48	9.52
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	3.05	0.34	6.55

5.4 Simulacija s 75% udjela autonomnih vozila

Za simulaciju s udjelom od 75% autonomnih vozila priložene su tablice koje iskazuju podatke vođenju prometa. Tablica 22 prikazuje raskrižja tj. dionice te udaljenost koju je vozilo prošlo u određenom vremenu. Tablica 23 pokazuje razinu usluge na raskrižjima dok tablica 24 daje uvid o ekološkim parametrima te brzini vozila. Na kraju, tablica 25 prikazuje kašnjenje na raskrižjima.

Tablica 22. Vrijeme putovanja vozila za 75% autonomnih vozila

Promatrana dionica	Broj vozila	Vrijeme putovanja [s]	Prijedena udaljenost [m]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	148	12.51	125.88
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	102	15.61	126.04
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	136	14.3	154.33
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	107	14.52	155.92
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	131	11.04	121.22
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	112	10.76	116.4
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	117	18.91	128.66
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	109	14.75	128.59
9. Zvonimirova Zapad-Istok	108	72.31	755.6
10. Zvonimirova Istok-Zapad	93	71.59	737.32

Tablica 23. Čvorovi za 75% autonomnih vozila

Dionica	Zvonimirova - Rusanova	Zvonimirova - Šulekova	Zvonimirova - Kušlanova	Zvonimirova - harambašićeva
Duljina kolone (broj vozila)	1.37	1.43	5.89	2.33
Broj vozila	289	291	336	278
Razina usluge	A	A	B	A
Kašnjenje	5.81	4.53	12.22	5.05
Kašnjenje zbog zaustavljanja [s]	2.23	2.59	6.56	2.23
CO [g]	150.436	121.473	242.798	127.553
NOX [g]	29.269	23.634	47.24	24.817
VOC [g]	34.865	28.152	56.271	29.562
Potrošnja [gal]	2.152	1.738	3.474	1.825

Tablica 24. Točke za prikupljanje podataka za 75% autonomnih vozila

Privoz	Broj vozila	Prosječna aritmetička brzina [km/h]	Prosječna harmoniska brzina [km/h]	Zauzeće [%]
Zvonimirova-Rusanova Zapad	165	39.28	10.38	14.14
Zvonimirova-Rusanova Istok	107	36.12	16.75	25.43
Zvonimirova-Rusanova Jug	13	19.26	8.89	21.42
Zvonimirova-Šulekova Zapad	142	42.57	4.84	21.03
Zvonimirova-Šulekova Istok	115	41.49	18.72	25.58
Zvonimirova-Šulekova Jug	8	9.72	1.39	18.35
Zvonimirova-Šulekova Sjever	7	10.07	5.37	1.44
Zvonimirova-Kušlanova Zapad	139	43.29	7.17	10.74
Zvonimirova-Kušlanova Istok	124	46.1	20.8	17.37
Zvonimirova-Kušlanova Jug	15	10.92	4.73	35.25
Zvonimirova-Kušlanova Sjever	10	12.67	4.12	29.99
Zvonimirova-Harambašićeva Zapad	133	35.6	18.66	43.02
Zvonimirova-Harambašićeva Istok	137	35.38	17.48	41.95
Zvonimirova-Harambašićeva Jug	17	19.68	7.09	28.03
Zvonimirova-Harambašićeva Sjever	52	15.66	5.26	60.96

Tablica 25. Rezultati kašnjenja za 75% autonomnih vozila

Dionica	Prosječno zaustavljeno kašnjenje [s]	Prosječni broj zaustavljanja po vozilu [%]	Prosječno kašnjenje svih vozila [s]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	1.22	0.24	4.17
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	3.1	0.7	7.27
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	1.7	0.27	3.98
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	1.69	0.29	4.17
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	1.11	0.17	2.83
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	1.49	0.2	3.05
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	6.44	0.73	10.19
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	2.88	0.4	6.22

5.5 Simulacija s 100% udjela autonomnih vozila

Posljednja simulacija imala je 100% udjela autonomnih vozila. Parametri vozila postavljeni su prema tablici 3 (poglavlje parametri) za All-knowing Car-following model vožnje prema Wiedemannovom 99 modelu. Uz to, uključene su opcije Cooperative Lane Change te Advanced merging. Tablica 26 pokazuje vrijeme putovanja vozila kroz raskrižja, te cijelu promatranu dionicu Zvonimirove ulice.

Tablica 26. Vrijeme putovanja vozila za 100% autonomnih vozila

Promatrana dionica	Broj vozila	Vrijeme putovanja [s]	Prijedena udaljenost [m]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	150	11.43	125.88
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	104	11.7	126.04
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	135	12.08	154.33
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	107	12.65	155.92
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	126	9.2	121.22
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	112	9.93	116.4
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	114	13.7	128.66
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	109	13.21	128.59
9. Zvonimirova Zapad-Istok	109	60.07	755.6
10. Zvonimirova Istok-Zapad	96	60.69	737.32

Nadalje, tablica 27 iskazuje podatke o razini usluge i ekološkim parametrima. Tablica 28 daje podatke o prosječnim brzinama, dok tablica 29 iskazuje kašnjenja na raskrižjima.

Tablica 27. Čvorovi za 100% autonomnih vozila

Dionica	Zvonimirova - Rusanova	Zvonimirova - Šulekova	Zvonimirova - Kušlanova	Zvonimirova - harambašićeva
Duljina kolone (broj vozila)	1.12	1.33	5.08	2.17
Broj vozila	22.51	22.95	43.17	42.79
Razina usluge	A	A	B	A
Kašnjenje vozila	4.78	4.17	10.44	4.31
Kašnjenje zbog zaustavljanja [s]	1.74	2.3	5.26	1.89
CO [g]	140.4	123.782	281.705	122.075
NOX [g]	27.317	24.084	54.81	23.751
VOC [g]	32.539	28.688	65.288	28.292
Potrošnja [gal]	2.009	1.771	4.03	1.746

Tablica 28. Točke za prikupljanje podataka za 100% autonomnih vozila

Privoz	Broj vozila	Prosječna aritmetička brzina (km/h)	Prosječna harmoniska brzina (km/h)	Zauzeće (%)
Zvonimirova-Rusanova Zapad	165	42.43	8.9	12.40
Zvonimirova-Rusanova Istok	108	46.91	19.63	24.98
Zvonimirova-Rusanova Jug	13	12.55	7.97	22.06
Zvonimirova-Šulekova Zapad	144	49.29	4.51	21.69
Zvonimirova-Šulekova Istok	115	47.98	20.84	23.97
Zvonimirova-Šulekova Jug	8	9.46	1.33	18.22
Zvonimirova-Šulekova Sjever	7	9.88	6.13	1.43
Zvonimirova-Kušlanova Zapad	138	49.02	7.7	10.45
Zvonimirova-Kušlanova Istok	124	48.7	18.27	18.33
Zvonimirova-Kušlanova Jug	15	9.87	4.45	35.46
Zvonimirova-Kušlanova Sjever	10	11.26	3.89	30.08
Zvonimirova-Harambašićeva Zapad	129	43.61	20.17	40.62
Zvonimirova-Harambašićeva Istok	138	36.81	15.77	42.20
Zvonimirova-Harambašićeva Jug	17	15.48	6.99	28.74
Zvonimirova-Harambašićeva Sjever	52	11.95	7.01	63.45

Tablica 29. Rezultati kašnjenja za 100% autonomnih vozila

Dionica	Prosječno zaustavljeno kašnjenje [s]	Prosječni broj zaustavljanja po vozilu [%]	Prosječno kašnjenje svih vozila [s]
1. Zvonimirova Rusanova Zapad-Istok	1.17	0.2	4.2
2. Zvonimirova Rusanova Istok-Zapad	1.73	0.38	4.48
3. Zvonimirova Šulekova Zapad-Istok	1.23	0.19	3.13
4. Zvonimirova Šulekova Istok-Zapad	1.49	0.25	3.74
5. Zvonimirova Kušlanova Zapad-Istok	0.68	0.12	2.14
6. Zvonimirova Kušlanova Istok-Zapad	1.39	0.21	3.29
7. Zvonimirova Harambašićeva Zapad-Istok	3.34	0.46	6.16
8. Zvonimirova Harambašićeva Istok-Zapad	2.26	0.3	5.86

6. RASPRAVA

Nakon svih provedenih simulacija te izvučenih relevantnih podataka, bilo je potrebno provesti analizu i usporedbu podataka u pronalaženju optimalnog rješenja. Za početak, sagledati će se vremena putovanja vozila kroz cijelu promatranu dionicu Zvonimirove ulice, tablica 30.

Tablica 30. Vrijeme putovanja kroz promatranu dionicu

Smjer kretanja	Vrijeme putovanja [s] 0%	Vrijeme putovanja [s] 25%	Vrijeme putovanja [s] 50%	Vrijeme putovanja [s] 75%	Vrijeme putovanja [s] 100%
Zvonimirova Zapad-Istok	62.72	67,52	70.02	72.31	60.07
Zvonimirova Istok-Zapad	64.56	67,91	69.38	71.59	60.69

Prema dobivenim podacima moguće je vidjeti kako prometna mreža sa stopostotnim udjelom autonomnih vozila ima najkraće vrijeme putovanje kroz Zvonimirovu ulicu, gdje se vidi pozitivan utjecaj autonomnih vozila. Također, pokazuje se kako vrijeme putovanja raste u kombinaciji AV-a i vozila upravljanim od strane vozača. Razlog tomu je što integriranjem autonomnih vozila među vozače na cesti postoje sigurnosni uvjeti koji se moraju ispuniti kako ne bi došlo do incidenta. Simulacijski parametri koji su omogućili povećanu sigurnost, u Car-following modelu su CC0 i CC1 (vidi Tablicu 3, parametri) za koje se uvjetuje veća vrijednost nego za druga AV. Isto tako, omogućeno je nametanje apsolutne udaljenosti kočenja iz razloga nemogućnosti komuniciranja AV sa ostalim prometom. Postizanjem stopostotne autonomnosti takvi sigurnosni uvjeti se mogu isključiti, budući da se postiže mogućnost komuniciranja i dijeljenja informacija svih vozila na prometnicama.

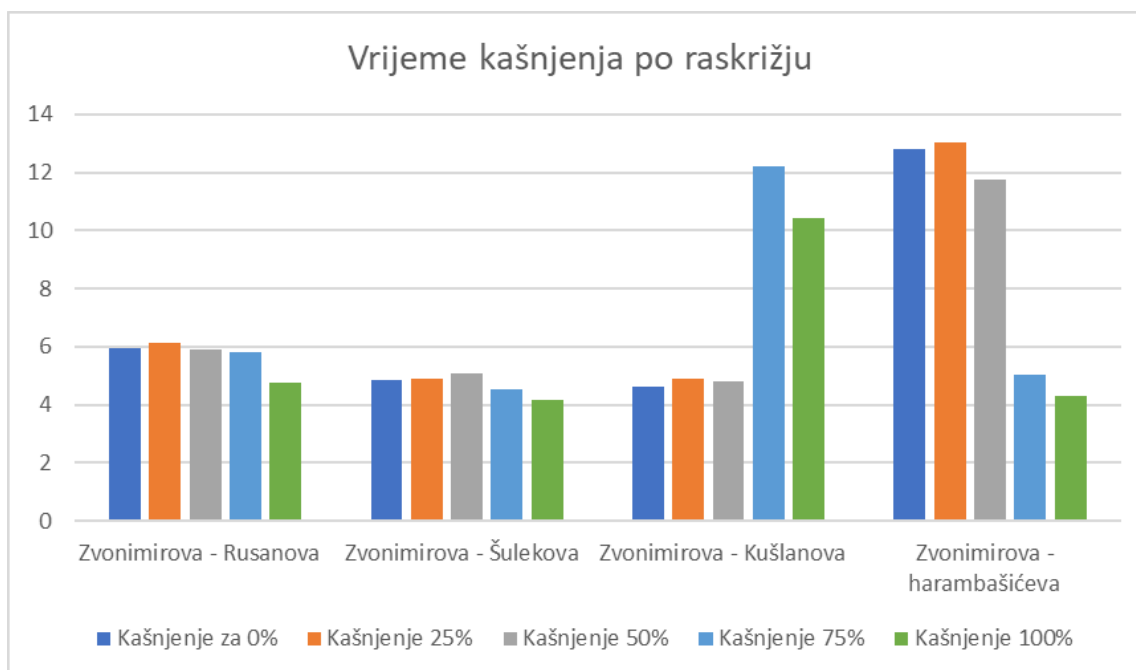
U nastavku, tablica 31 prikazuje duljine kolona na pojedinim raskrižjima ovisno o udjelu AV. Vrijednost prikazuje prosječan broj vozila na raskrižju u svakoj jedinici vremena simulacije. Pokazuje se kako su kolone najveće na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva s vrijednosti od 7.11 koja se smanjuje povećanjem udjela AV. S druge strane, prolaskom većeg broja vozila, na susjednom raskrižju Zvonimirova-Kušlanova, vrijednost duljine kolone raste. Za ostala raskrižja porastom autonomnih vozila, rezultati se poboljšavaju.

Tablica 31. Duljina kolone na raskrižjima

Udio AV	0%	25%	50%	75%	100%
Duljina kolone					
Zvonimirova - Rusanova	1.62	1.63	1.56	1.37	1.12
Zvonimirova – Šulekova	2.34	2.38	2.38	1.43	1.33
Zvonimirova – Kušlanova	1.6	1.6	1.5	5.89	5.08
Zvonimirova - Harambašićeva	7.11	6.6	5.58	2.33	2.17

Na temelju tablica koje prikazuju vremena kašnjenja po raskrižju, grafičkim prikazom na slici 25 vidljivo je da se vrijeme kašnjenja raskrižja Zvonimirova-Rusanova primjenom sve većeg udjela autonomnih vozila blago povećalo. Uz to, potpunom participacijom autonomnih vozila, vrijeme kašnjenja se smanjilo sa 6 na 4.5 sekunde. Raskrižje Zvonimirova - Šulekova pokazuje isto ponašanje.

Raskrižja Zvonimirova-Kušlanova i Zvonimirova-Harambašićeva su se primjenom sve većeg postotka autonomnih vozila u prometu dovela do drastičnih promjena u vremenima kašnjenja. Kada su autonomna vozila odsutna, kašnjenje na raskrižju Zvonimirova-Kušlanova je oko 4 sekunde, dok se na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva kreće u rasponu od 12 do 14 sekundi. Takvo stanje ostaje u tim razmjerima dok se dostigne razina od 75% autonomnih vozila. U prometnom sustavu vrijeme kašnjenja koje se pojavljivalo na raskrižju Zvonimirova-Harambašićeva se prebacilo na prethodno raskrižje Zvonimirova-Kušlanova. Na kraju, za 100% autonomnih vozila vremena kašnjenja su puno manja u odnosu na prethodna kašnjenja.



Slika 25. Vrijeme kašnjenja na raskrižju

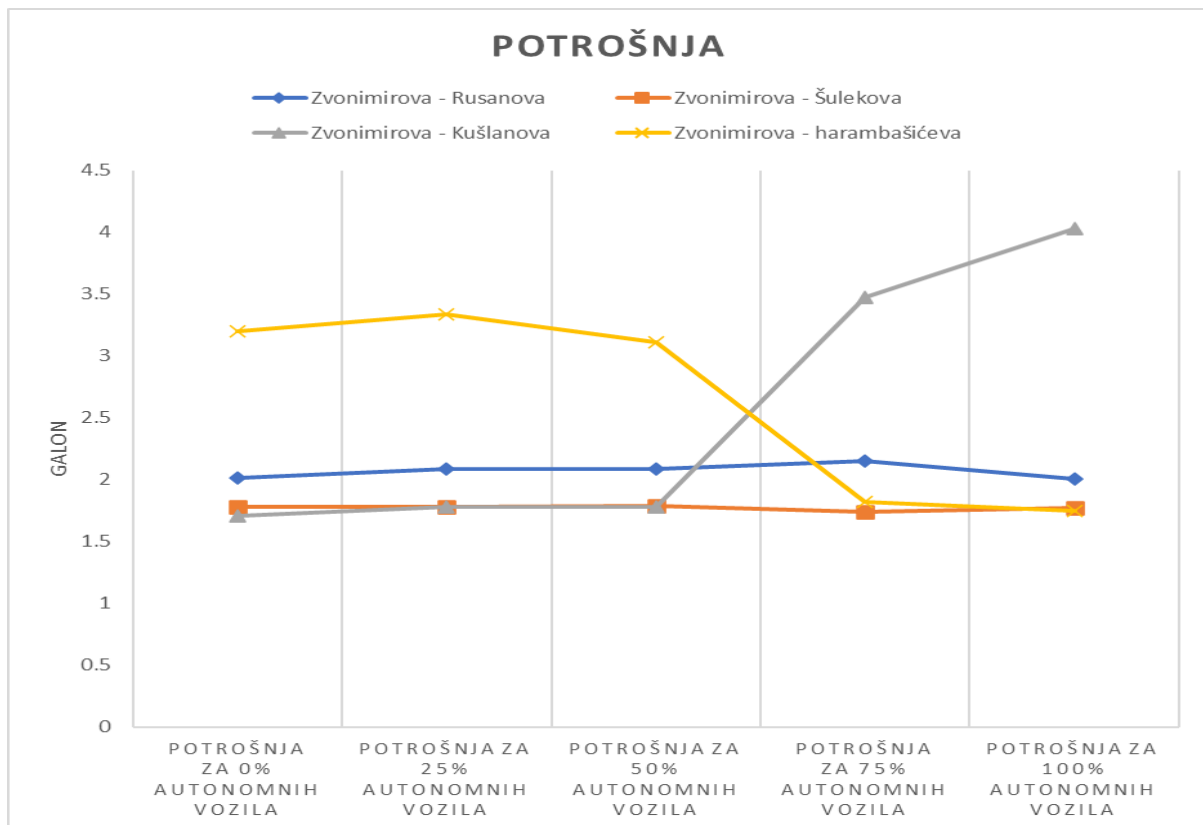
Razina usluge je podatak koji opisuje kvalitetu koju samo raskrižje nudi. Razina usluge ovisi o vremenu kašnjenja, duljini kolone te ostalim parametrima koji utječu na kvalitetu raskrižja. Razina usluge (tablica 32) se kroz povećanja udjela AV-a mijenja na raskrižjima Zvonimirova-Kušlanova te Zvonimirova-Harambašićeva. Prethodno prikazanim podacima vidljiva je promjena na tim raskrižjima gdje raskrižje Zvonimirova-Kušlanova s povećanjem AV-a ima veće vrijeme kašnjenja i duljinu kolone, dok raskrižje Zvonimirova-Harambašićeva ima niže vrijeme kašnjenja i duljinu kolone. Time je vidljiva proporcionalnost ostalih prometnih parametara koji prilikom pogoršanja smanjuju razinu usluge.

Tablica 32. Razine usluge na raskrižjima

Dionica	Zvonimirova - Rusanova	Zvonimirova - Šulekova	Zvonimirova - Kušlanova	Zvonimirova - Harambašićeva
Udio AV				
0%	A	A	B	A
25%	A	A	A	B
50%	A	A	A	B
75%	A	A	B	A
100%	A	A	B	A

Na kraju, potrebno je sagledati i ekološki utjecaj autonomnih vozila, odnosno potrošnju energenata, slika 26. Potrošnja kroz povećanje udjela autonomnih vozila se blago smanjuje na raskrižjima Zvonimirova-Rusanova i Zvonimirova-Šulekova. Raskrižje Zvonimirova-

Harambašićeva prilikom malih udjela autonomnih vozila ima najvišu razinu potrošnje, od oko 3.3 galona, gdje se povećanjem tih udjela AV-a ta vrijednost smanjuje na otprilike 1.7 galona. S druge strane, iz niske razine potrošnje od oko 1.6 galona na raskrižju Zvonimirova-Kušlanova, povećanjem udjela autonomnih vozila potrošnja skače na vrijednost od otprilike 3.6 galona. Razlika potrošnje goriva simulacije sa stopostotnim udjelom AV i udjelom AV od 0% je 0.857 galona goriva što je jednako 3.24 litara.



Slika 26. Potrošnja goriva

U svrhu usporedbe potrošnje energenata AV uzimamo kao električno vozilo, te je s tim u vezi dizel goriva od 3.24 litre jednak 32.4 kWh što rezultira prijeđenom putu od otprilike 186,3 kilometara za električno vozilo. Za vozilo na gorivo to rezultira 40.5 km, gdje se time pokazuje ušteda energije primjenom AV i u slučaju vozila na električni pogon ili na dizel motor. Prosječnim smanjenjem potrošnje goriva prikazano je smanjenje razine ispušnih plinova i čestica koje su štetne za okoliš.

Simulacijski alat PTV Vissim nije jedini simulacijski alat na tržištu. Uz njega postoji i simulacijski alat otvorenog koda SUMO koji bi se mogao koristiti kao usporedba za dobivanje rezultata istog problema na sličnoj prometnoj situaciji. Prema istraživanju utjecaja autonomnih vozila na promet, u SUMO simulatoru postoji izrađena simulacija kojom su opisani razni

scenariji udjela autonomnih vozila na promatranoj dionici autoceste. Prema dobivenim podacima pokazalo se kako je stopostotnim udjelom AV postignuta potpuna harmonizacija prometnog toka. Time se pokazao pozitivan utjecaj AV na prometni tok autocesta te na ekološki utjecaj prometa. Isto tako, pokazalo se kako scenariji udjela AV od 50% i 75% pozitivno utječu na promet sa manjim smanjenjem prometnog toka [29]. Uspoređujući sa utjecajem AV u urbaniziranom prometu, postepenim povećanjem udjela AV, razina usluge odnosno protok prometa se smanjuje zbog konflikta AV i stvarnih vozača. Postizanjem stopostotne autonomnosti takvi negativni učinci se u potpunosti isključuju.

7. ZAKLJUČAK

S obzirom na kontinuirani porast broja stanovnika, proporcionalno tome raste i broj vozila na prometnicama. Uzevši to u obzir, javlja se potreba za dodatnim razvojem prometne infrastrukture koja bi to mogla popratiti. Dio tog razvoja odnosi se i na uvođenje autonomnih vozila koja imaju sposobnost povećanja same sigurnosti odvijanja prometa, kao i pozitivnog utjecaja na smanjenje štetnog utjecaja na okoliš. Isto tako, autonomna vozila utječu na smanjenje zagušenja na raskrižjima.

U ovom radu nastojalo se ispitati postoji li korist uvođenja autonomnih vozila, i ako da, kolika je ona zapravo, te kako će postepeno uvođenje autonomnih vozila utjecati na odvijanje prometa postojećom prometnom mrežom. Na temelju prethodno odrađenih simulacija, može se ustvrditi kako autonomna vozila ne daju velika unaprjeđenja po pitanju samih prometnih parametara, no valja napomenuti kako ona ne pogoršavaju cjelokupni sustav, nego ga blago unaprjeđuju (u slučajevima miješanja sa ostalim cestovnim vozilima). Prema simulacijama nisu utvrđena velika unaprjeđenja, no s kvalitetnom integracijom potrebne prometne infrastrukture, poput komunikacije V2V (od vozila prema vozilu) i V2I (od vozila prema infrastrukturi), ukupni dobitak može biti ogroman što bi posljedično dovelo do unaprjeđenja života svih građana. Simulacije su prikazale zanimljiv trend brzine odvijanja prometa, gdje se pokazalo da je sam promet najsporiji sa udjelom od 50% i 75% udjela autonomnih vozila na cestama, a razlog leži u tome što se integriranjem definirane količine autonomnih vozila među vozila kojima se upravlja od strane čovjeka, stvaraju dodatni sigurnosni uvjeti koje je potrebno ispuniti u svrhu izbjegavanja prometne nesreće ili nezgode. S druge strane, s udjelom autonomnih vozila od 100%, brzina odvijanja prometa rapidno raste, što dokazuje pozitivan utjecaj moguće integracije autonomnih vozila. Osim bržeg odvijanja prometa, korist leži i u utjecaju na okoliš, budući da se u tom slučaju više ne bi koristilo gorivo. Uz to, ljudi više ne bi morali trošiti dio svojih financijskih sredstava na isto.

U konačnici, može se ustvrditi kako potpuna autonomnost prometnog sustava može donijeti dosta koristi, no sam put prema tome ne bi trebao biti lagan, a jedan od navedenih razloga je taj što brzina prometa pada s postepenim povećanjem udjela autonomnih vozila na cestama sve dok ne taj udio ne dođe na konačnih 100%. Time definitivno ostaje pitanje, jesu li ljudi spremni za cijeli projekt potpune integracije autonomnih vozila proći sav taj put.

ZAHVALA

Zahvaljujemo mentoru doc. dr. sc. Miroslavu Vujiću na usmjeravanju, savjetima i pomoći prilikom izrade rada te provedbe istraživanja.

LITERATURA

1. TWI Global. "What Is an Autonomous Vehicle?" *TwI-Global.com*, 2019, www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-an-autonomous-vehicle.
2. Weber, Marc. "Where To? A History of Autonomous Vehicles - CHM." *CHM*, 8 May 2014, computerhistory.org/blog/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles/.
3. Department for Transport London, United Kingdom Atkins. "Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow: Stage 1: Evidence Review." *Trid.trb.org*, 1 Mar. 2016, trid.trb.org/view/1448450.
4. MINISTARTVO UNUTARNJIH POSLOVA. "Pravilnik O Načinu Postupanja Policijskih Službenika U Obavljanju Poslova Nadzora I Upravljanja Prometom Na Cestama." *Narodne-Novine.nn.hr*, 2010, narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2011_12_141_2831.html.
5. Malibari, Areej, et al. "Assessing the Impacts of Autonomous Vehicles on Road Congestion Using Microsimulation." *Sensors*, vol. 22, no. 12, 10 June 2022, p. 4407, <https://doi.org/10.3390/s22124407>.
6. Al-Turki, Mohammed, et al. "Impacts of Autonomous Vehicles on Traffic Flow Characteristics under Mixed Traffic Environment: Future Perspectives." *Sustainability*, vol. 13, no. 19, 6 Oct. 2021, p. 11052, <https://doi.org/10.3390/su131911052>. Accessed 12 Dec. 2021.
7. Guériau, Maxime, and Ivana Dusparic. "Quantifying the Impact of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Efficiency and Safety in Mixed Traffic." *IEEE Xplore*, 1 Sept. 2020, ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9294174.
8. Dinar, Yousuf. *Impact of Connected And/or Autonomous Vehicles in Mixed Traffic*. 2 Oct. 2020.
9. Park, Ji Eun, et al. "The Impact of Automated Vehicles on Traffic Flow and Road Capacity on Urban Road Networks." *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, no. 8404951, 3 Nov. 2021, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1155/2021/8404951>.
10. Vetter, Michael, et al. *AUTONOMOUS VEHICLES -101*.
11. Martínez-Díaz, Margarita, and Francesc Soriguera. "Autonomous Vehicles: Theoretical and Practical Challenges." *Transportation Research Procedia*, vol. 33, 2018, pp. 275–282, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518302606, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.103>.

12. TWI Global. "What Is an Autonomous Vehicle?" *TwI-Global.com*, 2019, www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-an-autonomous-vehicle.
13. "Introduction to Autonomous Driving Sensors ECOTRON." *Ecotrons.com*, ecotrons.com/news/introduction-to-autonomous-driving-sensors-blog/. Accessed 26 Apr. 2023.
14. Rangesh, Akshay, and Mohan Manubhai Trivedi. "No Blind Spots: Full-Surround Multi-Object Tracking for Autonomous Vehicles Using Cameras and LiDARs." *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 4, no. 4, Dec. 2019, pp. 588–599, <https://doi.org/10.1109/tiv.2019.2938110>.
15. "Woodman God's Eye 360 Bird View Car Camera (3D View)." *Hiwoodman*, hiwoodman.com/product/woodman-gods-eye-360-bird-view-car-camera/. Accessed 26 Apr. 2023.
16. Bilik, Igal, et al. "The Rise of Radar for Autonomous Vehicles: Signal Processing Solutions and Future Research Directions." *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 5, Sept. 2019, pp. 20–31, <https://doi.org/10.1109/msp.2019.2926573>.
17. Vazquez, Marta Martinez. "Radar for Automotive: Why Do We Need Radar?" *Semiconductor Engineering*, 24 Mar. 2022, semiengineering.com/radar-for-automotive-why-do-we-need-radar/.
18. Royo, Santiago, and Maria Ballesta-Garcia. "An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles." *Applied Sciences*, vol. 9, no. 19, 30 Sept. 2019, p. 4093, <https://doi.org/10.3390/app9194093>.
19. "How LiDAR Technology Is Shaping Our Lives." *DENSOx*, denso-x.com/stories/how-lidar-technology-is-shaping-our-lives/.
20. Youjing Cui, and Shuzhi Sam Ge. "Autonomous Vehicle Positioning with Gps in Urban Canyon Environments." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 1, Feb. 2003, pp. 15–25, <https://doi.org/10.1109/tra.2002.807557>.
21. Rewire Security. "GPS Tracking : A Brief History | Rewire Security Blog." *Rewire Security*, 5 Feb. 2019, www.rewiresecurity.co.uk/blog/gps-tracking-satellite-history.
22. Xu, W., et al. "Analyzing and Enhancing the Security of Ultrasonic Sensors for Autonomous Vehicles." *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, 1 Dec. 2018, pp. 5015–5029, ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8451864, <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2867917>.

23. Babak Shahian Jahromi. "Ultrasonic Sensors in Self-Driving Cars." *Medium*, Medium, 3 June 2019, medium.com/@BabakShah/ultrasonic-sensors-in-self-driving-cars-d28b63be676f.
24. Pendleton, Scott, et al. "Perception, Planning, Control, and Coordination for Autonomous Vehicles." *Machines*, vol. 5, no. 1, 17 Feb. 2017, p. 6, <https://doi.org/10.3390/machines5010006>.
25. "A Driverless Car That Went Rogue Could Be a Taste of the Robo Uprising." *New Scientist*, www.newscientist.com/article/mg25333720-100-a-driverless-car-that-went-rogue-could-be-a-taste-of-the-robo-uprising/. Accessed 26 Apr. 2023.
26. "Traffic Simulation Software | PTV Vissim | MyPTV." *Www.myptv.com*, www.myptv.com/en/mobility-software/ptv-vissim.
27. Sukennik, Peter . *Micro-Simulation Guide for Automated Vehicles -Final*. 2 Mar. 2020.
28. Zakon HR. "Zakon O Sigurnosti Prometa Na Cestama - Zakon.hr." *Www.zakon.hr*, 1 Jan. 2023, www.zakon.hr/z/78/Zakon-o-sigurnosti-prometa-na-cestama.
29. Babić, L. (2022). Analiza utjecaja simulacijskih parametara autonomnih vozila na prometni tok autocesta (Diplomski rad). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:836015>

DODACI

Popis ilustracija:

Slika 1. Komponente autonomnih vozila [13]	11
Slika 2. 360° kamera u automobilu [15]	12
Slika 3. RADAR [17].....	13
Slika 4. LIDAR [19]	14
Slika 5. GPS [21]	15
Slika 6. Ultrazvučni senzor [23]	16
Slika 7. DRSC [25]	18
Slika 8. Prikaz sučelja PTV Vissim simulacijskog alata	20
Slika 9. Legenda vremenskog prikaza izmjene signala	26
Slika 10. Prikaz signalnog plana.....	27
Slika 11. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Rusanova	30
Slika 12. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Šulekova	33
Slika 13. Prikaz plana i položaja signala Zvonimirova-Šulekova	34
Slika 14. Signalni plan Zvonimirova-Šulekova	35
Slika 15. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Kušlanova	37
Slika 16. Prikaz plana i položaja signala Zvonimirova-Kušlanova	38
Slika 17. Signalni plan Zvonimirova-Kušlanova.....	39
Slika 18. Grafički prikaz prometnog opterećenja raskrižja Zvonimirova-Harambašićeva.....	41
Slika 19. Prikaz plana i položaja signala Zvonimirova-Harambašićeva.....	42
Slika 20. Signalni plan Zvonimirova-Harambašićeva	43
Slika 21. Prikaz stvorenih linkova	44
Slika 22. Signalni plan u simulaciji	45

Popis tablica:

Tablica 1. Razine autonomnosti [12]	10
Tablica 2. Vissim prometni parametri	22
Tablica 3. Parametri praćenja vozila.....	23
Tablica 4. Parametri promjene trake	23
Tablica 5. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Rusanova.....	29
Tablica 6. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Šulekova.....	32
Tablica 7. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Kušlanova.....	36
Tablica 8. Brojanje prometa na raskrižju Zvonimirova - Harambašićeva	40
Tablica 9. Vrijeme putovanja vozila za 0% autonomnih vozila	47
Tablica 10. Čvorovi za 0% autonomnih vozila.....	48
Tablica 11. Razina usluge za 0% autonomnih vozila	49
Tablica 12. Točke za prikupljanje podataka za 0% autonomnih vozila	49
Tablica 13. Rezultati kašnjenja za 0% autonomnih vozila	50
Tablica 14. Vrijeme putovanja vozila za 25% autonomnih vozila	51
Tablica 15. Čvorovi za 25% autonomnih vozila	52
Tablica 16. Točke za prikupljanje podataka za 25% autonomnih vozila	52
Tablica 17. Rezultati kašnjenja za 25% autonomnih vozila	53

Tablica 18. Vrijeme putovanja vozila za 50% autonomnih vozila	53
Tablica 19. Čvorovi za 50% autonomnih vozila.....	54
Tablica 20. Točke za prikupljanje podataka za 50% autonomnih vozila	54
Tablica 21. Rezultati kašnjenja za 50% autonomnih vozila	55
Tablica 22. Vrijeme putovanja vozila za 75% autonomnih vozila	55
Tablica 23. Čvorovi za 75% autonomnih vozila.....	56
Tablica 24. Točke za prikupljanje podataka za 75% autonomnih vozila	56
Tablica 25. Rezultati kašnjenja za 75% autonomnih vozila	57
Tablica 26. Vrijeme putovanja vozila za 100% autonomnih vozila	57
Tablica 27. Čvorovi za 100% autonomnih vozila.....	58
Tablica 28. Točke za prikupljanje podataka za 100% autonomnih vozila	58
Tablica 29. Rezultati kašnjenja za 100% autonomnih vozila	59
Tablica 30. Vrijeme putovanja kroz promatranu dionicu	60
Tablica 31. Duljina kolone na raskrižjima	61
Tablica 32. Razine usluge na raskrižjima	62