

# Analiza utjecaja simulacijskih parametara autonomnih vozila na prometni tok autocesta

---

**Babić, Lidija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:836015>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Lidija Babić**

**ANALIZA UTJECAJA SIMULACIJSKIH  
PARAMETARA AUTONOMNIH VOZILA NA  
PROMETNI TOK AUTOCESTA**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2022.**

Zagreb, 5. svibnja 2022.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**  
Predmet: **Simulacije u prometu**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 6899

Pristupnik: **Lidija Babić (0135250601)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Analiza utjecaja simulacijskih parametara autonomnih vozila na prometni tok autocesta**

### Opis zadatka:

Zbog sve veće pojave autonomnih vozila na cestovnim prometnicama, potrebno je predvidjeti njihov utjecaj na razinu usluge i sigurnosti kretanja na prometnicama. Simulacijski alati, kojima se modelira stvarni prometni sustav, služe za prognozu prometa i proučavanje prometnog toka zbog promjene regulacije, rekonstrukcije ili izgradnje prometne infrastrukture. Shodno tome, nužno je definirati ključne parametre za simuliranje autonomnih vozila u prometnom sustavu te utjecaj promjene veličina definiranih parametara.

Cilj istraživanja je definirati parametre koji opisuju kretanje autonomnih vozila i analizirati njihov utjecaj na ponašanje prometnog toka. U tu svrhu bit će izrađena mikrosimulacija autoceste koja sadrži klasična i autonomna vozila. Simulacija će biti izrađena u programskom alatu SUMO koji se koristi u akademskim zajednicama zbog koncepta otvorenog koda.

Istraživanje će obuhvatiti ponašanje autonomnih vozila, njihov stupanj autonomije, utjecaj na kognitivne sposobnosti vozača te utjecaj na ostale sudionike u prometu. Analiza ponašanja autonomnih vozila sastoji se od usporedbe klasičnih i autonomnih vozila na temelju karakteristika vožnje.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

doc. dr. sc. Luka Novačko

**Sveučilište u Zagrebu**  
**Fakultet prometnih znanosti**

**DIPLOMSKI RAD**

**ANALIZA UTJECAJA SIMULACIJSKIH PARAMETARA  
AUTONOMNIH VOZILA NA PROMETNI TOK AUTOCESTA**

**ANALYSIS OF AUTONOMOUS VEHICLES SIMULATION  
PARAMETERS IMPACT ON TRAFFIC FLOW AT  
MOTORWAYS**

Mentor: doc. dr. sc. Luka Novačko

Student: Lidija Babić

JMBAG: 0135250601

**Zagreb, 2022**

*Moja ljubav prema prometu, znanje i interes potaknuti su od strane mentora **doc.dr.sc Luke Novačka**, koji ne samo da je izvrstan mentor kroz studij nego mentor kroz život.*

*Zahvaljujem **Filipu Vrbaniću mag. ing. traff.** na svim savjetima i doprinosu ovom radu.*

*Zahvaljujem **svojoj velikoj obitelji** na strpljivosti i podršci kroz studij.*

*Želim zahvaliti **Leu Tišljariću** koji mi pomaže u svakom koraku mojih izazova, koji me potiče i vjeruje u mene.*

*Također, hvala svim ljudima koji su uljepšali moj put do diplome, a posebno **Heleni, Ivi i Duji**.*

*Nikako ne želim izostaviti izraziti zahvale svom **nastavnom i nenastavnom osoblju Fakulteta prometnih znanosti** koji su uvelike doprinijeli mom stručnom i osobnom razvoju.*

## Sažetak

Povećanjem prometne potražnje zbog razvoja urbanih središta, smanjuje se protok te stupanj sigurnosti prometa. Time se pojavljuje potreba za uvođenjem novih tehnologija u infrastrukturnom te suprastrukturnom području. Rezultat toga su autonomna vozila s kojima je cilj postići potpunu harmonizaciju i sigurnost sudionika u prometu. Kako bi se postigao definirani cilj, prometni tok mora biti homogen. U ovom radu izrađena je simulacija u kojoj prometni tok čine autonomna vozila i konvencionalna vozila. Kako bi se kretanje autonomnih vozila prilagodilo kretanju vozila kojima upravlja čovjek, potrebno je provesti analizu kretanja autonomnih vozila mijenjajući parametre ponašanja s ciljem odabira ključnih parametara, te njihovih vrijednosti u ovisnost o prometnoj situaciji. Rezultati istraživanja pokazuju da većim udjelom autonomnih vozila te smanjenim razmakom između vozila postiže se pozitivan utjecaj na prometni tok.

KLJUČNE RIJEČI: Autonomna vozila; konvencionalna vozila; prometni tok; parametri prometnog toka; simulacija

## Summary

The consequence of increased traffic demand, due to the development of urban centres, is reduced traffic flow and level of traffic safety. This creates a need for the developing new technologies in the infrastructural and superstructural areas. The result is autonomous vehicles, intending to achieve complete harmonization of traffic flow and safety for the traffic users. To achieve the defined goal, the traffic flow must be homogeneous. The simulation created in this paper defines a traffic flow consisting of autonomous vehicles and conventional vehicles. In order to adapt the movement of autonomous vehicles to the movement of human-driven vehicles, it is necessary to analyse the movement of autonomous vehicles by changing the behaviour parameters to select key parameters and their values, depending on the traffic situation. The research results show that a higher proportion of autonomous vehicles and a reduced distance between vehicles have a positive impact on traffic flow.

KEYWORDS: Autonomous vehicles; conventional vehicles; traffic flow; traffic flow parameters; simulation

## Sadržaj

1	Uvod .....	1
1.1	Cilj istraživanja .....	2
1.2	Dosadašnja istraživanja .....	2
1.3	Struktura rada .....	3
2	Značajke autonomnih vozila .....	4
2.1	Stupnjevi autonomne vožnje .....	5
2.2	Specifikacije komponenti autonomne vožnje .....	8
3	Programski alati za simuliranje cestovne prometne mreže .....	11
3.1	AIMSUN .....	11
3.2	PTV Vissim .....	13
3.3	SUMO .....	14
4	Analiza ključnih parametara za simulaciju autonomnih vozila .....	16
5	Rezultati istraživanja .....	19
5.1	Ukupno vrijeme putovanja vozila na mreži .....	21
5.2	Prosječno vrijeme putovanja vozila na mreži .....	25
5.3	Prosječna brzina vozila na glavnom toku .....	30
5.4	Prosječna gustoća prometa na glavnom toku .....	34
5.5	Ispušni plinovi .....	37
5.6	Potrošnja energije .....	40
6	Zaključak .....	44
	Literatura .....	46
	Popis slika .....	49



Popis grafikona.....	50
Popis tablica .....	51
Popis kratica.....	52
Prilog A: Simulacijski parametri .....	53

# 1 Uvod

Autonomna vozila (AV), koja su u sve većem udjelu sudionika i korisnika cestovne prometne mreže, stvaraju potrebu za promjenom načela promatranja, predikcije i upravljanja prometnim tokovima te građenja i održavanja cestovne infrastrukture. Kako bi se takva inovacija automobilske industrije, ispravno i sa punim potencijalom, iskoristila za pozitivan utjecaj na rast i razvoj cestovnog prometa, potrebno je unaprijed predvidjeti i definirati parametre autonomnih vozila čije će vrijednosti povećati efikasnost bilo gledajući kroz sigurnosne aspekte ili kroz kvalitetu odvijanja prometnog toka. Takva potreba zahtjeva izradu simulacije prometne mreže s ciljem predviđanja i definiranja parametara autonomnih vozila koja pogoduju uvjetima prometnih tokova. AV ponašaju se prema unaprijed definiranim parametrima i pravilima koji čine tok autonomnih vozila harmoniziranim što pozitivno utječe na prometni tok konvencionalnih vozila. Takva pojava čini harmonizirani prometni tok koji svojim parametrima pozitivno utječe na sigurnost u prometu, smanjenje zagađenja okoliša, povećanje razine prometne usluge i ostale aspekte koje utječu na cestovni promet. AV, iako postaju djelom sadašnjice, nisu u potpunosti implementirana na cestovnu infrastrukturu, te će se kao takva stupnjevito implementirati. Zbog toga dolazi do heterogenost prometnog toka, gdje se AV moraju prilagođavati konvencionalnim vozilima koja su ručno upravljana od strane čovjeka s ciljem osiguravanja sigurnosti prometnog toka, no s aspekta kretanja vozila, odnosno prometnog toka, implementira se kretanje vozila prema uzorku od strane AV, a time prenoseći isti uzorak ponašanja na vozila koja su upravljana od strane vozača. Odnosno, uvođenjem sve većeg broja AV čovjek će smanjivati svoj utjecaj na odvijanje prometnog toka na temelju čega će se smanjiti pojave pogrešaka, te povećati sigurnost i točnost u odvijanju cestovnog prometa. U ovom diplomskom radu promatra se utjecaj promjene parametara autonomnih vozila na prometni tok, te utjecaj udjela AV u cestovnoj mreži. U ovom radu će se istražiti parametri u kojoj prometnoj situaciji su najpogodnija kako bi se sigurnost i protočnost

održale, ali i povećale. Cestovna mreža simulacije se sastoji od autoceste dužine osam kilometara te dvije ulazne i jedne izlazne rampe. Promatra se samo jedan smjer vožnje autoceste. Simulacijski alat koji će se koristiti tijekom izrade simulacije je SUMO (eng. Simulation of Urban MObility) u kojemu će se dobiti izlazni prometni podatci s kojima će se tumačiti utjecaj autonomnih vozila na prometni tok.

## **1.1 Cilj istraživanja**

Cilj istraživanja je definirati parametre koji opisuju kretanje autonomnih vozila i analizirati njihov utjecaj na ponašanje prometnog toka na autocesti. U tu svrhu bit će izrađena mikrosimulacija autoceste koja sadrži konvencionalna vozila, AV, teška teretna vozila (TTV) i autobuse. Svrha istraživanja je definirati ključne parametre autonomnih vozila i njihov utjecaj na prometni tok korištenjem simulacijskih alata.

## **1.2 Dosadašnja istraživanja**

Uključivanjem autonomnih vozila u prometni tok, koji sadrži konvencionalna vozila u mješovitim stopama penetracije, javlja se novi tip toka. Za točnu simulaciju potrebno je definirati parametre prometnog toka U radu [1] autori su analizirali više različitih modela slijedeđenja vozila korištenih u softveru za mikrosimulaciju za modeliranje ponašanja konvencionalnih i autonomnih vozila u vožnji. U radu nije analiziran utjecaj različitih vrijednosti penetracija AV-a. Različiti modeli slijedeđenja vozila izvedeni u mikrosimulacijskom softveru za modeliranje ponašanja konvencionalnih i autonomnih vozila u vožnji također su analizirani u radu [2] s naglaskom na stupanj sigurnosti na semaforiziranom odnosno nesemaforiziranom raskrižju. Parametri koji su korišteni za modeliranje AV-a u prethodno navedenim istraživanja su fiksne unaprijed definirane vrijednosti. Ti parametri uključuju minimalni vremenski i prostorni razmak, ubrzanje i usporenje. U istraživanju [3] analiziran je utjecaj nametanja prometnih pravila prilikom kojega se promatralo ponašanje AV-a. Predložen je model koji koristi skup pravila za učenje s pozitivnom nagradom za poštivanje pravila i negativnom nagradom

koji kažnjava ponašanje u vožnji koje nije u skladu s pravilima. Predložena pravila povećala su sigurnost, ali pogoršala mjere učinkovitosti. Utjecaj različitih udjela penetracije AV nije uzet u obzir. Analiza strategija upravljanja pomoću strojnog učenja i učenja za mješovite prometne tokove na autocesti, bez naglaska na parametre AV vožnje, provedeno je u više novijih radova [4], [5], [6].

### 1.3 Struktura rada

Rad je sadržajno obrađen u 6 poglavlja:

1. Uvod
2. Značajke autonomnih vozila
3. Programski alat za simuliranje cestovne mreže
4. Analiza ključnih parametara za simulaciju autonomnih vozila
5. Rezultati istraživanja
6. Zaključak

Prvim poglavljem se opisuje tema istraživanja, navedeni su glavni ciljevi rada, dan je pregled relevantne literature i prikazan je sadržaj rada prema definiranim poglavljima. Drugim poglavljem se opisuju AV kao vrsta prijevoznog sredstva, tehničke značajke i njihov utjecaj na cestovnu mrežu. Treće poglavlje sadrži opis programskog alata za simuliranje autonomnih vozila na cestovnoj mreži. Četvrto poglavlje temeljeno je na opisu simulacije i njezinih značajki u vidu ulaznih parametara prometnog toka, cestovnog modela i međusobne kolaboracije te analizi parametara autonomnih vozila koji su od važnosti u smislu utjecaja na cestovnu mrežu. Petim poglavljem prikazani su rezultati te tumačenja rezultata simulacije. Šestim poglavljem iznesena je suma razrade teme te zaključna misao.

## 2 Značajke autonomnih vozila

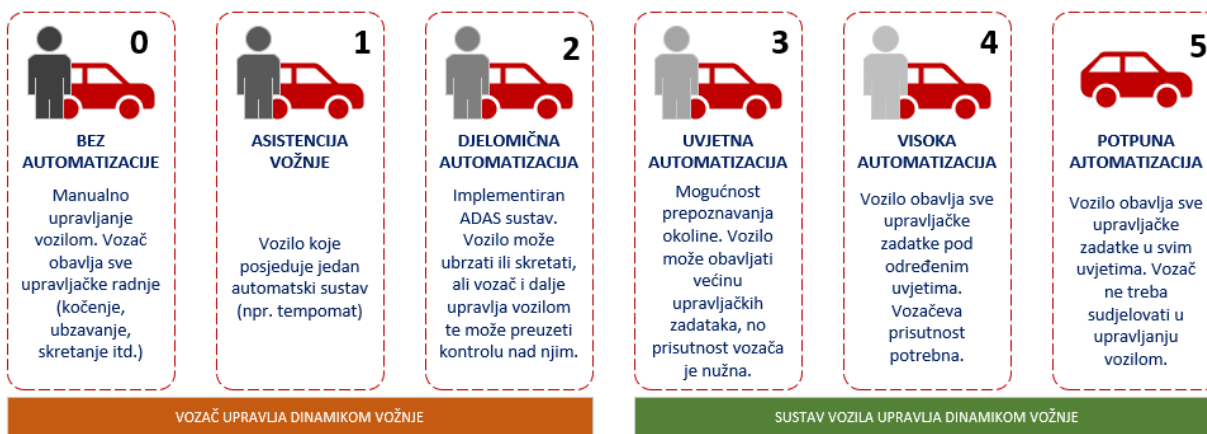
Autoindustrija, znanstveno istraživačka te druga područja koja su od interesa utjecati na promet, značajno doprinose autonomnoj vožnji, odnosno implementaciji autonomnih vozila na cestovnu mrežu. AV, prema svojim značajkama trebala bi postići pozitivan utjecaj na odvijanje cestovnog prometa, a time pozitivno utjecati na ostale grane prometa i okoliš zbog razvoja usmjerenog na električna vozila kao rješenje zagađivanju okoliša, ali i povećanju performansi vozila.

Iako su AV pozitivan čimbenik za cestovni promet, njihovo kretanje na prometnicama koja su predviđena za konvencionalnu vožnju nisu u potpunosti pozitivnog ishoda. Nove tehnologije zahtijevaju velike promjene u svim segmentima promatranog sustava pa tako i u slučaju implementacije AV dolazi do zahtjeva za promjenom infrastrukture. Cilj AV je da budu međusobno povezana kako bi se postigla potpuna harmonizacija na prometnom toku. Takav scenarij će biti moguć kada na prometnicama ne budu prisutna konvencionalna vozila. Tijekom postepene implementacije, AV moraju biti prilagođena načinu vožnje konvencionalnih vozila, što dovodi do mnogih izazova. Naime, AV se interpretiraju u više stupnjeva u rasponu od nula do pet. Takvim stupnjevanjem također se postiže efekt privikavanja vozača na kontrolu vožnje od strane sustava vozila. Može se postići približno slična dinamika vožnje te tijekom implementacije potpuno AV vozila stvoriti manja odstupanja u načinu upravljanja vozilom [7]. Čimbenici sigurnosti: vozilo, čovjek i cesta od velike su važnosti, neovisno gledajući ih izolirano ili sustavno. Najveći udio u sigurnosti prometa producira čovjek. Udio prometnih nesreća koje su uzrokovane ljudskom pogreškom tijekom upravljanja vozilom prelazi preko 90%. Razlog tome je što čovjek ima ograničene performanse i predispozicije za vožnju koje uključuju ograničenja vozača u različitim fazama percepcije, spoznaje, zaključivanja i donošenja odluka. Kada je u pitanju reakcija u situacijama velikih mogućnosti nastanka prometne nesreće, AV su u prednosti za 100%, odnosno imaju reakciju 0.5s dok vozači imaju 1s pri vožnji od 96km/h [8].

AV osim mogućih boljih reakcija na nepredvidive prometne situacije, svojom povezanošću mogu skratiti vrijeme putovanja pomoću sustava kojima su upravljani. Naime, AV su međusobno povezana te time dobivaju direktnu informaciju o kretanju vozila po prometnici. Takvim pristupom moguće je na prometnoj mreži optimalno distribuirati promet. AV bi svojom tehnologijom trebali pozitivno utjecati i donijeti veliki pomak u stupnju sigurnosti te smanjenju pojava repa čekanja uzrokovanih šok valovima na autocestama. Iako su danas prisutni sustavi koji pomoću svoje tehnologije mogu upravljati prometom tako što obavještavaju vozače o promjeni brzine, efekt smanjenja šok valova nije u potpunosti vidljiv jer se takvi sustavi oslanjaju na iskustvo i sposobnost vozača da prepozna i poštuje znakove. U nastavku teksta opisani su stupnjevi AV i tehnologije koje su prisutne u AV.

## 2.1 Stupnjevi autonomne vožnje

Stupnjevi automatizacije vozila, koju je definiralo Društvo automobilskih inženjera (eng. *SAE International*) [9], usvojeni su u cijelome svijetu te su postavljeni standardi prema kojima se razvijaju AV. Stupnjevi su definirani u rasponu od 0 do 5, gdje 0 prikazuje najmanju zastupljenost automatizacije u sustavu vozila, odnosno 5 najveću zastupljenost automatizacije u sustavu vozila. Od stupnja nula do stupnja dva vozač i dalje aktivno prati okoliš i ima većinski utjecaj na upravljanje vozilom. Od trećeg stupnja vozilo i sustav vozila doprinose kontroli i sigurnosti vožnje. Vozilo može u potpunosti prepoznati prijetnju i preuzeti kontrolu s ciljem smanjivanja posljedica, odnosno spriječiti nastanak nesreće. Vrhunac automatizacije postiže se u petom stupnju, gdje je postignuta potpuna nezavisnost vozila od vozačevih reakcija i kontrole nad vozilom. Vozilo se kreće i obavlja prijevoz na svim vrstama ceste, u svim vremenskim situacijama i svim prometnim situacijama. U današnjici u svijetu je moguće vidjeti stupnjeve automatizacije do četvrtog stupnja te su poneke autoindustrije najavile proizvodnju autonomnih vozila petog stupnja. Slika 1 prikazuje stupnjeve autonomnosti vozila. U nastavku teksta opisano je svih šest stupnjeva automatizacije vozila [10].



Slika 1. Stupnjevi autonomne vožnje [10]

**Razina 0 (Bez automatizacije):** Sva vozila koja su u potpunosti pod kontrolom i upravljanjem od strane vozača. Upravljanje, ubzavanje, usporavanje, kočenje te nagle reakcije provodi isključivo vozač. Sustavi koji su uključeni u ovu kategoriju su sustavi za održavanje vozila, odnosno sustavi upozorenja o količini rashladne tekućine, tlaka, ulja itd. [10].

**Razina 1 (Pomoć vozaču):** Vozila koja posjeduju specifične sustave upravljanja, ali je također potrebna radnja od strane vozača. Primjeri takvih sustava su pomoć pri održavanju trake i prilagodljivi tempomat. Danas su spomenuti sustavi vidljivi u gotovo svim vozilima koji sudjeluju u prometu [10].

**Razina 2 (Djelomična automatizacija):** Vozilo ima kontrolu nad ubzavanjem, usporavanjem i kočenjem, ali vozač mora biti u svakom trenutku spreman preuzeti kontrolu nad vozilom u slučaju da vozilo nema mogućnost u potpunosti izvesti radnju. Automobili razine dva su dostupni na tržištu te uključuju dva ili više kombiniranih automatiziranih funkcija [10].

**Razina 3 (Uvjetna automatizacija):** Vozilo ima potpunu kontrolu nad vožnjom no u ograničenim situacijama. Vozač mora biti spreman preuzeti kontrolu u situacijama gdje

sustav vozila ne može samostalno izvršiti radnju. Vozila automatizacije stupnja tri uglavnom koriste RADAR sustave za pozicioniranje i snalaženje u prostoru [10].

**Razina 4 (Visoka automatizacija):** Vozila imaju kontrolu nad svim kritičnim situacijama te pažnja vozača nije potrebna. Vozač ne mora biti prisutan na vozačevom sjedalu ali može uzeti kontrolu nad vozilom u željenom trenutku [10].

**Razina 5 (Potpuna automatizacija):** Vozač ne mora niti mu je dopušteno upravljanje vozilom. Vozilo provodi sve radnje i u potpunosti je samostalno [10].

Prema EU zakonu od 6. srpnja 2022. godine obavezna oprema u vozilima su određeni ADAS (eng. Advanced Driver-Assistance System) sustavi koji povećavaju stupanj sigurnosti u prometu. Napredni sigurnosni sustavi namijenjeni su smanjenju broja nesreća te povećanju mogućnosti povezanosti automobila, a time potiču razvoj i implementaciju autonomije vozila. Sustavi koji su obvezni u vozilu su [11]:

- inteligentna prilagodba brzine,
- automatsko kočenje nuždi,
- sustav za održavanje vozila u prometnoj traci,
- uređaj za ugradnju alkoholne blokade,
- detekcija pospanosti,
- asistent za vožnju za vožnju unatrag,
- memorija podataka o nesreći (crna kutija),
- svjetlo kočnice u nuždi.

Prema definiranim stupnjevima AV-a vidljivo je kako industrija doseže same vrhunce autonomije, no cestovna infrastruktura nije paralelno razvijana što može stvarati nepovoljne ishode neovisno o kvaliteti tehnologije implementirane u AV. Shodno tome, potrebno je stupnjevito primjenjivati sustave autonomne vožnje što zahtjeva kalibraciju AV ovisno o područjima i situacijama u kojima će se kretati.



## 2.2 Specifikacije komponenti autonomne vožnje

Prema istraživanju [12] definirane su ključne tehnologije nužne za sustav AV-a. Tehnologije su sljedeće: navigacijski sustav vozila, lokacijski sustav, mapiranje, planiranje kretanja vozila, sustav za percepciju okoline, laserski sustav za percepciju, radarski sustav za percepciju, vizualni sustav za percepciju, kontrola kretanja vozila, percepcija kretanja vozila i metode kontrole vozila. U nastavku teksta opisać će se svaki od navedenih tehnologija.

**Navigacijski sustav vozila:** U navigacijskom sustavu vozila potrebne su geografski informacijski sustav GPS (eng. Global Positioning System) kako bi definirali longitudinalnu i latitudalnu poziciju vozila iz satelita. Te informacije, zajedno sa lokacijskim sustavom i bazom podataka digitalnih mapa, implementirane su u sustav mapiranja koji sa svojim algoritmima planiranja definira optimalnu rutu u trenutku te definira trenutnu lokaciju vozila [12].

**Lokacijski sustav vozila:** Glavna svrha lokacijskog sustava je definirati i prepoznati lokaciju vozila koja može biti opisana kao relativna, apsolutna ili hibridna lokacija. Relativnom lokacijom, trenutna pozicija vozila definirana je udaljenostima i smjeru kretanja do definirane lokacije. Trenutna lokacija vozila, zbog vibracija vozila, može prikazati devijaciju između trenutne i izračunate lokacije vozila. Apsolutna lokacija vozila definira se pomoću sustava pozicioniranja. Neki od sustava su GPS, GLONASS, Galileo itd. No takvi sustavi, zbog smetnji kao što su zgrade, vrijeme, planine i slično, znaju prekidati vezu između satelita i vozila koji šalje koordinate te se time dobiva kriva apsolutna pozicija vozila. Hibridna lokacija vozila, koja kombinira sustave apsolutne i trenutne lokacije, je najčešći sustav putem kojeg se definira lokacija vozila[12].

**Elektronička mapa (EM):** EM se koristi za bazu podataka koja sadrži geografske karakteristike, informacije o prometu, informacije o objektima, znakovima, prometnim građevinama i slično. Većina EM koje se koriste u AV su dizajnirane za korištenje od strane čovjeka. Danas se također pojavljuju HD mape koje imaju visoki stupanj detaljnosti

u koordinatama gdje udaljenosti definiraju u centimetrima. Kod HD mapa podatci o prometu su detaljniji i točniji. EM su definirane u tri sloja: dinamički, aktivni i analitički. Aktivni sloj ima, uz klasične mape, definirane oblike prometnica, smjerove, attribute prometnica, nivelaciju, zaštitne ograde, drveće, tipove rubova prometnice, oznake na cesti i slično. Dinamički sloj generira stvarne trenutne podatke drugih vozila i senzora prometnica. Analitički sloj pomaže da algoritmi u autonomni sustav vozila uče na temelju obrađenih i spremljenih podataka. U današnjici aktivni sloj je korišten u ADAS sustavu te mu je preciznost u 1-5 m [12].

**Mapiranje:** Fundamentalna je za planiranje puta kretanja vozila. Njome definiramo lokaciju vozila pomoću geografskih informacija GPS-a i INS-a (eng. Internal Navigation System) te informacije karte od EM-a [12].

**Planiranje kretanja vozila:** Koristi se kako bi bila definirana optimalna ruta vožnje od početne do destinacijske lokacije. Uglavnom se koriste algoritmi planiranja puta kao što su Dijkstra algoritam, Bellman - Ford algoritam, Floyd algoritam i heuristički algoritam pomoću kojih se generiraju EM podatci i izračuna optimalni put za vozilo [12].

**Sustav za percepciju okoline:** Kako bi vozilo donosilo odluku o upravljanju potrebne su mu informacije. Glavne metode percepcije okoline su laserski senzor, vizualni senzor i radarski senzor. Pomoću dobivenih informacija od nabrojanih senzora vozilo pomoću sustava za percepciju okoline generira podatke te prepoznaje objekte kao što su kamen na cesti, prepreka, oznake na cesti i slično [12].

**Laserski sustav za percepciju:** Sustav u kojemu se laserski puls šalje na određeni objekt te reflektirajućim sustavom dobije podatak o udaljenosti i kutu objekta te oblik objekta [12].

**Radarski sustav za percepciju:** Korišten je za prepoznavanje udaljenosti. Kako bi se postigla ta mjerenja, radarski senzor mjeri vrijeme udaljenosti pomoću refleksije poslanih valova [12].

**Vizualni sustav za percepciju:** Potreban je za prepoznavanje prometne signalizacije. Također se koristi za definiranje okoline, procjenu kretanja i slično. Vizualna percepcija vozila koristi se za dvije glavne funkcije. Jedna je temeljena na lociranju vozila u okolini dok je druga razumijevanje okoline temeljem informacija dobivenih kroz sliku. Takav pristup zahtjeva umjetnu inteligenciju i strojno učenje kako bi se slike obradile te pohranile dobivene podatke. Tako se postiže mogućnost prepoznavanja prometne signalizacije i prometnih znakova te oznaka na cesti [12].

**Sustav upravljanja vozilom:** Podrazumijeva kontrolu brzine i smjer kretanja vozila. Funkcionalnosti kontrole vozila su praćenje stanja senzora vozila i metoda upravljanja vozilom. Kako bi se postigla kontrola nad brzinom kretanja te smjerom kretanja, EM informacije, uključujući percepciju okoline, status vozila, prometnu regulaciju te stupanj vozačkih sposobnosti su inputi za modul percepcije. Temeljem toga algoritam upravljanja vozila izvodi izračune kontrolnog cilja te prenosi informacije sustavu upravljanja vozilom. Sustav upravljanja vozilom je glavna komponenta autonomne vožnje te kontrolira razne sustave vozila: protuprovalni sustav, protu-proklizavajući sustav, elektronički sustav stabilnosti vozila, senzorski kočioni sustav, pomoćni kočioni sustav, dodatni sustav za zadržavanje i radarski sustav za izbjegavanje sudara, sustav automatskog mijenjanja brzine, sustav tempomata itd [12].

**Percepcija brzine i smjera kretanja vozila:** Za percepciju brzine se koristi fotoelektrični kod, dok se kod fotoelektričnog kuta i potencijometar koriste u percepciji smjera. Fotoelektrični kutni kodni disk služi za kodiranje i pretvaranje izmjerene kutnog pomaka u digitalni izlazni signal. Vozilo može koristiti i GPS/INS ili referentni sustav za položaj i smjer kako bi se percipirao status vozila [12].

Definirane i opisane tehnologije pomažu pri kretanju AV po cestovnoj mreži u prisustvu konvencionalnih vozila. Takvi sustavi stavljaju AV vozila u prednost zbog mogućnosti definiranja rute unaprijed u ovisnosti prometnog opterećenja na pojedinim dijelovima cestovne mreže te unaprijed dobivajući podatke o brzinama kretanja i potencijalnim predvidivim opasnostima.

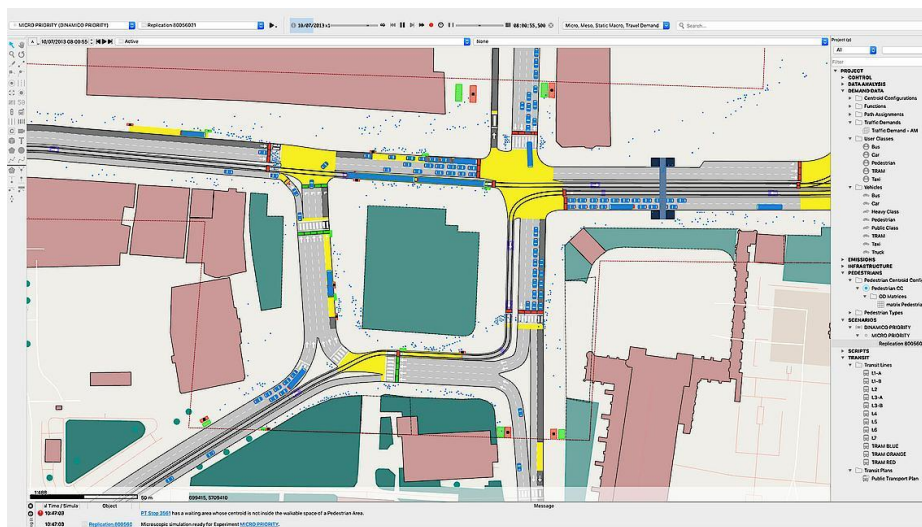
### 3 Programski alati za simuliranje cestovne prometne mreže

Konstantnim povećanjem prometa na cestovnoj mreži smanjuje se kvaliteta odvijanja prometa, a time stvara potreba za poboljšanjem operativne učinkovitosti postojećih mreža. Simulacijski alati su računalni programi koji su dostupni na računalima te služe za modeliranje određenog prometnog područja s ciljem detaljnije analize prometne mreže. Sve promjene na postojećim sustavima moraju utvrditi operativnu učinkovitost prije implementacije na teren. Prednost korištenja simulacijskog alata posebno se ističe prilikom analize kompleksnog prometnog sustava zbog mogućnosti analize interaktivnih učinaka različitih komponenata sustava. Također simulacija omogućava raspodjelu modela u vremenske intervale s ciljem analize u nekoliko vremenskih odsječaka što omogućuje promatranje stvaranja, raspršivanja i trajanja prometnih zagušenja. Razvijeno je nekoliko simulacijskih modela prometa koje se mogu koristiti u različite svrhe. Mnoga istraživanja su pridonijela evaluaciji simulatora kako bi se simulacijski alati potvrdili kao učinkoviti i prikladni alati. SUMO, PTV (njem. Planung Transport Verkehr), Vissim i Aimsun su mikro-simulacijski alati koji se razmatraju u ovom radu. Svaki simulacijski alat ima svoje specifičnosti te se svaki korisnik ili prometni stručnjak, ovisno o prometnoj situaciji i studiji, može usmjeriti na jedan od njih. U daljnjem tekstu opisuje se svaki simulacijski alat zasebno. Prilikom usporedbe vodit će se računa o potrebama za izradu simulacije istraživanja.

#### 3.1 AIMSUN

AIMSUN (eng. Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks) je simulator koji služi reprodukciji stvarnih prometnih uvjeta različitih prometnih mreža na računalu. Pogodan je za izradu mikro i makro simulacije. Tijekom razdoblja simulacije, svako pojedino vozilo se kontinuirano modelira prema nekoliko modela ponašanja kao što su: praćenje vozila, promjena trake i razmak između vozila. AIMSUN je integriran u GETRAM (eng. Generic Environment for TRaffic Analysis and

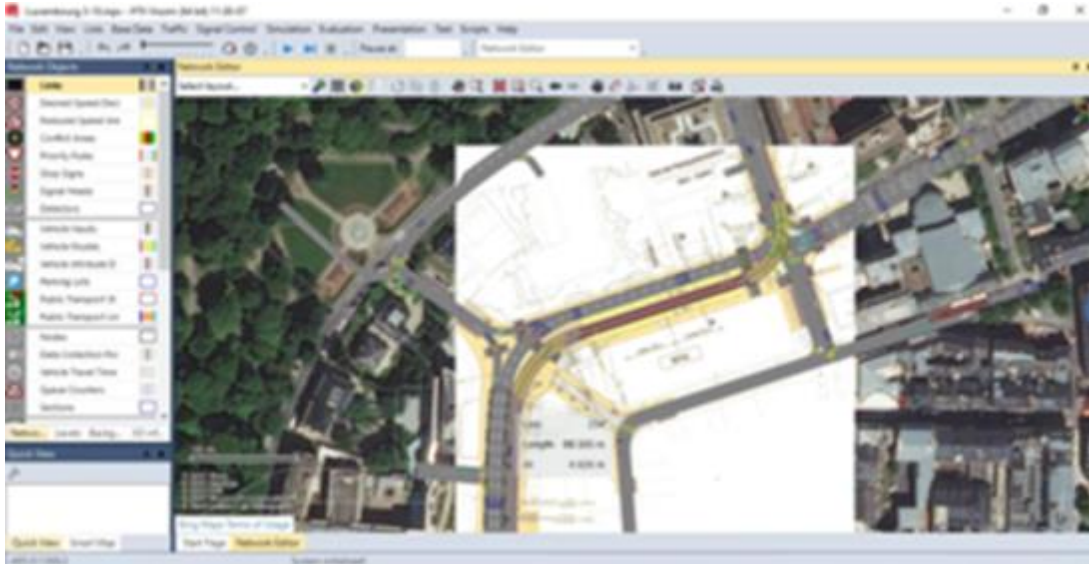
Modeling) simulacijsko okruženje koje se sastoji od: uređivača prometne mreže (TEDI), mrežne baze podataka, modula za izvođenje simulacije i aplikacijskog programskog sučelja kojemu je cilj povezivanje sa drugim simulacijama ili dodijeljenim modelima. Model je također sposoban komunicirati s vanjskim korisničkim definiranim aplikacijama kao što je logika kontrole u stvarnom vremenu. To se postiže uz pomoć dodatne GETARM [13]ekstenzije. Program omogućava vrlo detaljno modeliranje prometne mreže: jasna specifikacijska razlika između tipova vozila, modeliranje prometa prema zahtjevima prometnog toka ili prema OD (eng. Origin-Destination) matrici, mogućnost korištenja različitih tipova prometnica, mogućnost korištenja različitih sustava upravljanja prometom, ne samo fiksnim signalnim planom nego i adaptivnim pomoću nadograđivah aplikacija. Također može se mjeriti utjecaj incidencija i varijabilnih signalnih znakova. AIMSUN također može replicirati bilo koju vrstu detektora kojima se prikupljaju osnovna mjerenja kao što su broj vozila, brzina, gustoća, razmak između vozila na bilo kojem području cestovne mreže. Slika 2. prikazuje korisničko sučelje programa [14].



Slika 2. Korisničko sučelje simulacijskog alata AIMSUN [14]

## 3.2 PTV Vissim

Vissim je stohastički mikroskopski simulacijski model razvijen od strane Njemačke tvrtke PTV-a (njem. Planung Transport Verkehr). Namjenjen je za izradu transportnog modela (Slika 3). Temelji se na vremenskim intervalima i definiranom ponašanju elemenata simulacije. Razvijen je za modeliranje gradskog prometa i operacija javnog prijevoza. Model se interno sastoji od dvije komponente koje komuniciraju putem sučelja. Prva komponenta je prometni mikrosimulacijski simulator prometne mreže koji simulira kretanja vozila i generira odgovarajuće izlazne podatke koji opisuju kretanje vozila. Druga komponenta, nazvana generator stanja signala (eng. signal state generator), ažurira status signala za sljedeći korak simulacije. Određuje status signala koristeći informacije detektora iz simulatora prometa na bazi diskretnog vremenskog koraka (varijacija od prvog do desetog koraka u sekundi) i prosljeđuje status natrag u simulaciju. Inputi u VISSIM-u uključuju pridodavanje prometa na određene primetne trake, geometrijske karakteristike temeljene na OD matricama ili brzini prometnog toka i postocima skretanja po različitim tipovima vozila, distribucije brzina vozila, ubrzanja i usporavanja te signalnog plana. Signalni plan može biti fiksni ili adaptivan. Vissim pruža mogućnost mjerenja učinkovitosti koje se obično koristi u struci prometnog inženjerstva kao što je ukupno kašnjenje, vrijeme kašnjenja, duljina repa čekanja na prometnici, emisije ispušnih plinova i potrošnja goriva. Model je uspješno primijenjen kao koristan alat u raznim transportnim projektima kao što su razvoj i evaluacija logike prioriteta tranzitnog signala, evaluacija i optimizacija prometnih operacija u kombiniranoj mreži koordinirane i adaptivne prometne signalizacije itd. [14].

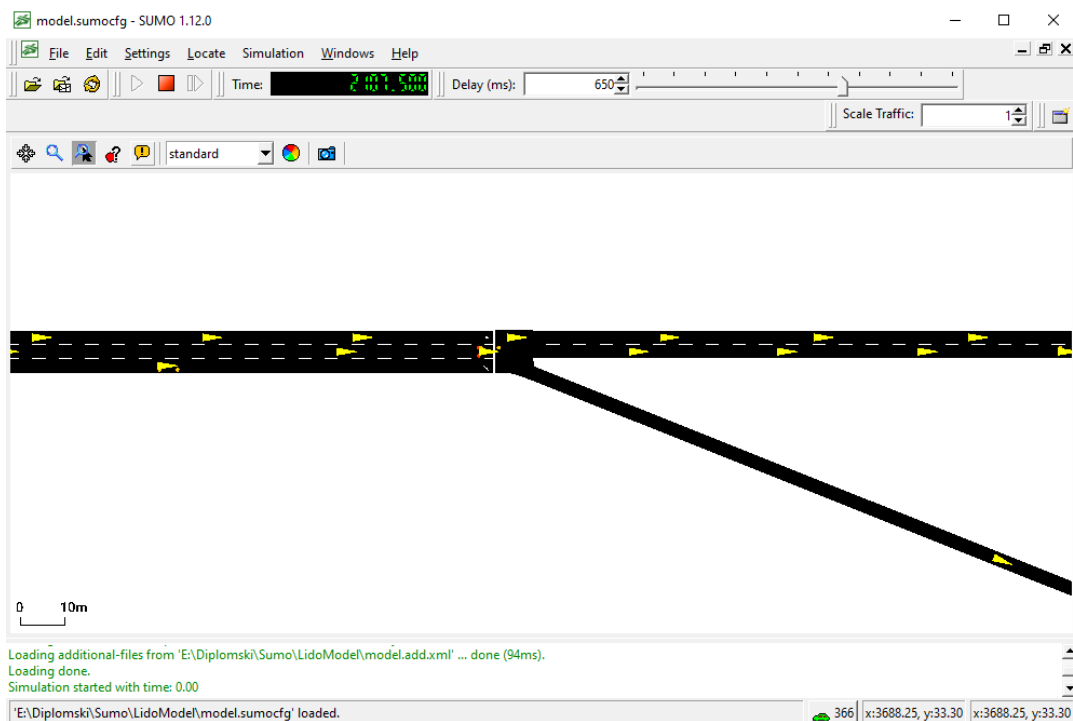


Slika 3. Korisničko sučelje simulacijskog alata VISSIM[15]

### 3.3 SUMO

SUMO (Slika 4) je paket za simulaciju prometa otvorenog koda. Koristi se u gotovo svim istraživanjima prometne tematike bilo da je riječ o strategiji upravljanja prometom ili modeliranje ili nadogradnja prometne mreže. Osmišljen je od strane Njemačke tvrtke DLR (njem. Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt). Mikroskopski je simulacijski alat koji slikovito i numerički daje podatke o cestovnoj mreži i svim entitetima na njoj. Svako vozilo u simulacije deklarirano je identifikacijskim imenom kojim pratimo podatke kretanja i brzine pojedinog vozila. Prema potrebama prometnog stručnjaka moguće je svako vozilo okarakterizirati sa detaljnijim i preciznijim podacima kao što su podatci o ulasku i izlasku vozila u simulaciju, pridodavanje vozila na određenu prometnu traku, pozicija svakog vozila. Svakom vozilu dodijeljen je tip koji opisuje fizičke karakteristike vozila te način kretanja na prometnoj mreži. Svako vozilo se može zasebno okarakterizirati klasama ispušnih plinova ili stvaranja buke. Za definiranje generiranja vozila na mrežu koriste se OD matrice koje opisuju kretanje vozila po zonama prometne mreže definirane prema broju vozila u vremenu. SUMO sučelje također podržava aplikaciju "od2trips" koja konvertira OD matrice na individualno kretanje vozila u

simulaciji. Simulacija je prema početnim specifikacijama definiran vremenskim koracima od jedne sekunde. Svaki položaj vozila opisan je prometnicom na kojoj se vozilo nalazi i udaljenosti od početka prometnice. Prilikom kretanja vozila po prometnici izračunava se brzina svakog vozila na temelju slijeđenja vozila. U simulaciji se mogu koristiti dva djela sučelja, vizualni i numerički koji daje outpute simulacije. SUMO mikrosimulacijski alat vizualno je jednostavniji i manje detaljan u odnosu na prethodna dva simulacijska alata. Prednost kod simulacijskog alata SUMO je njegova jednostavnost i otvoreni kod. Prema potrebama istraživanja za ovaj rad SUMO se pokazao kao zadovoljavajući simulacijski alat[16].

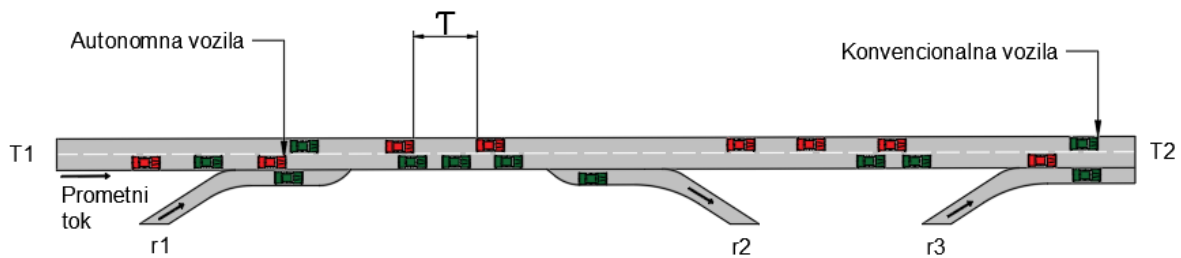


Slika 4. Korisničko sučelje simulacijskog alata SUMO



## 4 Analiza ključnih parametara za simulaciju autonomnih vozila

Prema analizi pojedinih simulacijskih programa, simulacijski alat SUMO je pogodan alat za analizu definirane teme. U simulaciji je modeliran scenarij na autocesti, gdje je promatran jedan smjer vožnje. Model sadrži dvije prometne trake ukupne dužine 8 km, dvije ulazne i jednu izlaznu rampu koje imaju pripadajuće trake za ubrzanje i usporenje (Slika 5). Ukupno trajanje simulacije je 2h, odnosno 24 mjerenih 5min intervala unutar kojih je simulirano normalno stanje prometne mreže i povećana prometna potražnja.



Slika 5. Shematski prikaz autoceste korištene za simulaciju

U SUMO simulaciji korišteno je TraCI (eng. Traffic Control Interface) sučelje kojim se u cestovnoj simulaciji dohvaćaju vrijednosti simuliranih objekata te manipulira njihovim ponašanjem. TraCI sučelje korišteno je za povezivanje SUMO-a i Python skripte s kojom se izravno kontroliraju parametri simulacije te provode prometna i ekološka mjerenja. Svaka simulacija traje dva sata, dok je kontrolni vremenski korak postavljen na intervale od pet minuta.

Tablica 1 i Tablica 2 prikazuju opis simulacijskih parametara korištenih za izradu SUMO simulacije, dok je izvorni izgled korištenih HTML skripti za podešavanje parametara dostupan je u prilogu A.

Tablica 1 prikazuje parametre vozila koja su korištena u simulaciji. Definirano je pet tipova vozila: konvencionalna vozila s dvije vrste goriva (dizel i benzin), TTV, autobusi i AV. Za podešavanje parametara konvencionalnih vozila, TTV-a i autobusa

korištene su standardne vrijednosti [17]. Parametri autonomnih vozila podešeni su u skladu s relevantnom literaturom [18], [19] kako bi parametri vozila ukazivali na „vozača koji ne može napraviti pogrešku“. Navedeno se postiže uz podešavanje parametara indeks utjecaja ljudske greške s vrijednosti 0, devijacijom brzine 0% i minimalnog razmaka ( $\tau$ ) od 0,5 s. Za daljnju analizu i prikaz rezultata ovog rada korištena su dva parametra: udio AV na autocesti i  $\tau$ . Ostali parametri (indeks ljudske greške i devijacija brzine) nisu uvršteni u analizu, jer bi povećanje tih parametara dovelo do smanjenja autonomnosti AV u simulaciji.

Tablica 1. Simulacijski parametri vozila

Klasa vozila	Benzin	Dizel	Autobus	TTV	AV
<b>Dimenzije (dšv)</b>	5 m; 1,8 m; 1,5 m	5 m; 1,8 m; 1,5 m	14 m; 2,6 m; 4 m	16,5 m; 2,55 m; 4 m	5 m; 1,8 m; 1,5 m
<b>Min. razmak</b>	1,1 s	1,1 s	1,1 s	1,1 s	<b>0,5 s</b>
<b>Ubrzanje</b>	2,6 m/s <sup>2</sup>	2,6 m/s <sup>2</sup>	1,1 m/s <sup>2</sup>	1,1 m/s <sup>2</sup>	2,6 m/s <sup>2</sup>
<b>Usporenje</b>	4,5 m/s <sup>2</sup>	4,5 m/s <sup>2</sup>	4 m/s <sup>2</sup>	4 m/s <sup>2</sup>	4,5 m/s <sup>2</sup>
<b>Max. brzina</b>	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h
<b>Emisijski razred</b>	EURO5	EURO5	-	EURO5	Električno vozilo
<b>Devijacija brzine</b>	20%	20%	20%	20%	<b>5%</b>
<b>Indeks ljudske greške</b>	0,7	0,7	0,7	0,7	<b>0</b>

Tablica 2. prikazuje simulacijske parametre prometnog toka. Ovi parametri direktno utječu na stanje prometne mreže zbog povećanja odnosno smanjenja prometne potražnje na pojedinim dionicama autoceste. Prometni tok na glavnom toku je modeliran s 2200voz/h prvih 20min simulacije, dok je od 20 do 60min povećan na 2800voz/h, da bi od 60 do 120min bio reduciran na inicijalnih 2200voz/h. Prva ulazna rampa ima konstantnu potražnju od 400voz/h, dok druga ulazna rampa ima potražnju od 1100voz/h.

Tablica 2. Simulacijski parametri prometnog toka

Dionica autoceste	Početak (min)	Kraj (min)	Tip vozila	Potražnja (voz/h)
T1 - T2	0	20	Benzin	776
			Dizel	1029
			Autobus	19
			TTV	76
T1 - r2	20	120	Benzin	123
			Dizel	162
			Autobus	3
			TTV	12
r1 - T2	0	120	Benzin	123
			Dizel	162
			Autobus	3
			TTV	12
r1 - r2	0	120	Benzin	41
			Dizel	54
			Autobus	1
			TTV	4
r3 - T2	0	120	Benzin	452
			Dizel	598
			Autobus	10
			TTV	40
T1 - T2	20	60	Benzin	1144
			Dizel	1516
			Autobus	28
			TTV	112
T1 - T2	60	120	Benzin	776
			Dizel	1029
			Autobus	19
			TTV	76

## 5 Rezultati istraživanja

Simulacija u kojoj su navedeni ključni parametri kretanja autonomnog vozila, osobnog konvencionalnog vozila, autobusa i TTV-a je generirala podatke o stanju prometne mreže. Pomoću dobivenih podataka tumačen je utjecaj promjene vrijednosti parametra  $\tau$  na prometnu mrežu u ovisnosti o zastupljenosti AV u prometnom toku. Pomoću dobivenih podataka mogu se zaključiti pogodne vrijednosti parametra  $\tau$  u slučaju prisutnosti AV vozila od 30%, 50%, 75% i 100%. Pomoću Python skripte i TraCI sučelja dobiveni su sljedeći prometni parametri koji su tumačeni kroz daljnji tekst:

- TTS (eng. Total Time Spent) (voz·h): ukupno vrijeme koje sva vozila provedu na mreži;
- MTT (eng. Mean Travel Time) (s): prosječno vrijeme koje sva vozila provedu na mreži;
- $\bar{v}$  (km/h): prosječna brzina svih vozila postignuta na glavnom toku mreže;
- $\bar{g}$  (voz/km): prosječna gustoća prometa na glavnom toku mreže.

Također pomoću Python skripte i TraCI sučelja dobiveni su sljedeći ekološki podatci:

- Ispušni plinovi: CO<sub>2</sub> (kg), PMX (g), CO (kg);
- Gorivo (l), potrošnja goriva na mreži simulacije;
- Električna energija (kWh), potrošnja električne energije električnih vozila na cestovnoj mreži simulacije;
- TEC (kWh) (eng. Total Energy Consumption) ukupna potrošnja energije vozila na cestovnoj mreži simulacije.

Svi od navedenih parametara su zasebno analizirani te se izolirano promatra utjecaj promjene parametara na njihove vrijednosti. Takav pristup je potreban kako bi se vidjeli individualni, ali i generalni utjecaj na prometni tok. U nastavku teksta prikazane

su dobivene vrijednosti simulacije. Tablica 3 prikazuje izlazne vrijednosti rezultata simuliranih parametara.

Tablica 3. Prikaz mjerenih vrijednosti rezultata simulacije s različitim udjelom autonomnih vozila

Udio AV (%)	$\tau$ (s)	TTS (veh x h)	MTT (s)	v (km/h)	g (veh/km)	CO <sub>2</sub> (kg)	PMX (g)	CO (kg)	Gorivo (l)	El. Energija (kWh)	TEC (kWh)
0	0.3	851.90	393.64	58.66	53.19	12520.30	365.30	67.00	4992.50	0.00	51822.30
	0.6	851.90	393.64	58.66	53.19	12520.30	365.30	67.00	4992.50	0.00	51822.30
	0.9	851.90	393.64	58.66	53.19	12520.30	365.30	67.00	4992.50	0.00	51822.30
	1.2	851.90	393.64	58.66	53.19	12520.30	365.30	67.00	4992.50	0.00	51822.30
30	0.3	652.40	315.98	73.65	40.73	8919.70	264.70	42.00	3550.90	1912.40	38771.40
	0.6	697.30	331.45	69.77	43.53	9392.50	285.50	44.00	3738.10	3788.40	42590.00
	0.9	694.60	332.11	69.76	43.36	9210.20	277.70	43.00	3665.40	3729.30	41775.20
	1.2	742.70	347.04	65.90	46.34	9238.70	281.00	43.60	3674.40	3657.40	41797.30
50	0.3	575.20	282.52	82.91	35.87	6745.10	213.30	31.50	2682.10	3266.90	31103.70
	0.6	612.30	296.10	78.98	38.18	7064.50	224.20	31.80	2806.50	6430.40	35561.70
	0.9	615.90	300.67	77.63	38.43	7027.70	221.00	31.60	2790.40	6333.30	35295.10
	1.2	674.70	318.27	72.06	42.10	7097.40	226.60	31.90	2816.90	6181.80	35421.90
75	0.3	550.30	266.73	87.02	34.35	4469.70	159.00	17.40	1767.20	4941.50	23284.10
	0.6	570.10	277.59	83.79	35.55	4576.80	163.60	17.40	1809.20	9695.30	28474.90
	0.9	579.90	281.21	83.05	36.15	4459.40	158.00	16.60	1761.30	9516.60	27801.10
	1.2	614.60	295.18	78.76	38.31	4499.00	160.60	16.10	1776.60	9306.40	27748.10
100	0.3	432.00	215.75	109.59	26.91	1827.70	82.20	2.30	710.00	6912.00	14281.80
	0.6	441.20	219.95	107.37	27.54	1862.20	84.70	2.40	724.10	13631.30	21145.30
	0.9	457.70	227.50	103.66	28.58	1893.70	85.60	2.30	735.70	13499.20	21135.00
	1.2	475.20	234.35	100.45	29.65	1983.40	91.30	2.30	770.50	13386.10	21385.20

## 5.1 Ukupno vrijeme putovanja vozila na mreži

TTS je ukupno vrijeme u kojemu sva vozila provedu na mreži u vremenu simulacije od 120min u simulacijskim koracima od 5min. TTS se prikazuje izrazom:

$$TTS = TTT + TWT \quad (1)$$

gdje je:

- $TTT$  - ukupno vrijeme putovanja svih vozila na glavnom toku;
- $TWT$  - ukupno vrijeme čekanja svih vozila.

Nadalje, TTT (eng. Total Travel Time) se prikazuje izrazom:

$$TTT = t \sum_{k=0}^K N(k) \quad (2)$$

gdje je:

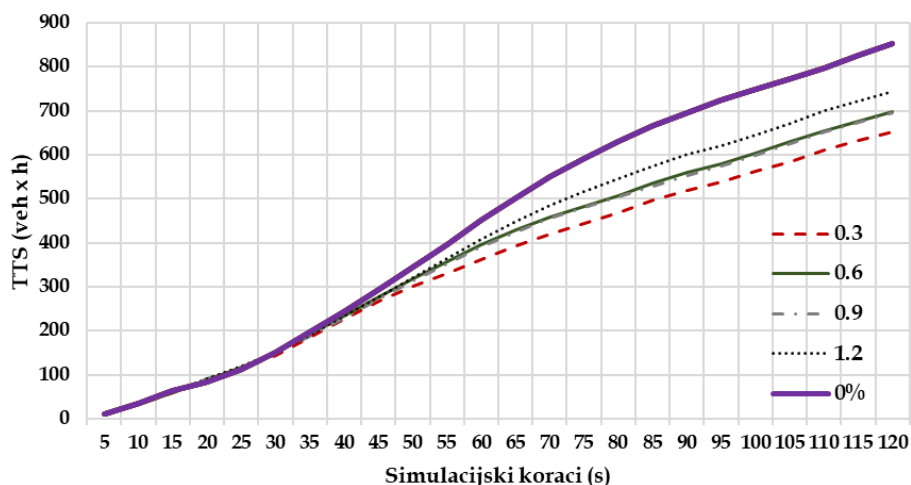
- $k \in \{0,1,2, \dots K\}$  - indeks koraka simulacije;
- $K$  - ukupno trajanje simulacije;
- $N$  - ukupan broj vozila na glavnom prometnom toku.

Dok se TWT (eng. Total Waiting Time) prikazuje izrazom:

$$TWT = t \sum_{k=0}^K M(k) \quad (3)$$

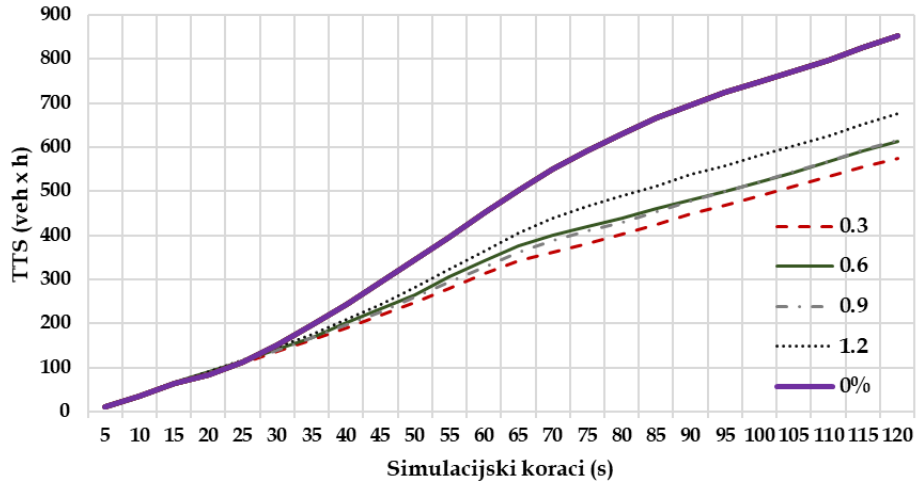
gdje je  $M(k)$  broj vozila koja stoji u vremenskom trenutku  $k$ .

Graf 1 prikazuje kako se sa povećanjem  $\tau$  povećava ukupno vrijeme provedeno u simulaciji. Slične rezultate sa svim vrijednostima  $\tau$  postižu sve do 45min. Tijekom cijelog trajanja simulacije, vrijednost parametra  $\tau$  od 0,6 do 0,9 međusobno ne stvaraju značajan utjecaj na stanje cestovne mreže. U odnosu na udio od 0% autonomnih vozila, 30% autonomnih vozila postižu pozitivan učinak na cestovnu mrežu sa svim vrijednostima  $\tau$ .



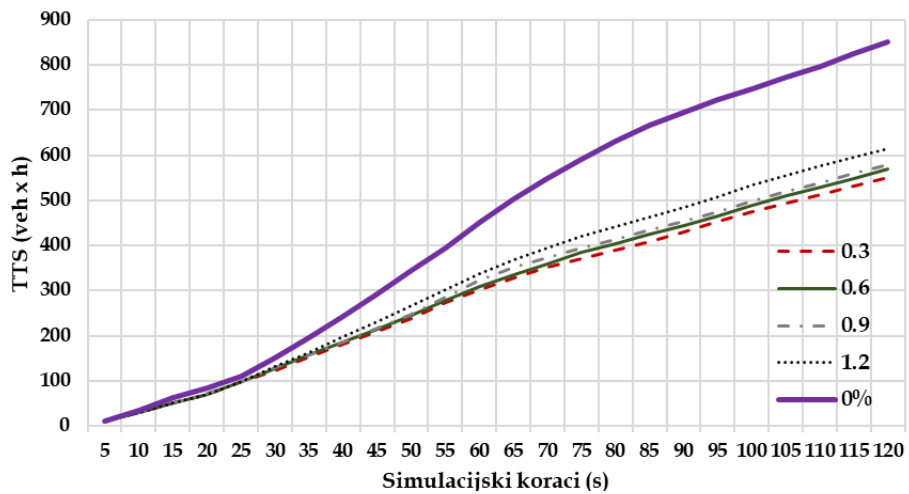
Graf 1. TTS - 30%autonomnih vozila

Graf 2 prikazuje kako se sa povećanjem  $\tau$  povećava ukupno vrijeme provedeno u simulaciji. Slične rezultate sa svim vrijednostima  $\tau$  postižu sve do 25min. Tijekom cijelog trajanja simulacije, vrijednost parametra  $\tau$  od 0,6 do 0,9 međusobno ne stvaraju značajan utjecaj na stanje cestovne mreže. U odnosu na udio od 0% autonomnih vozila, 50% autonomnih vozila postižu pozitivan učinak na cestovnu mrežu sa svim vrijednostima  $\tau$ .



Graf 2. TTS - 50 % autonomnih vozila

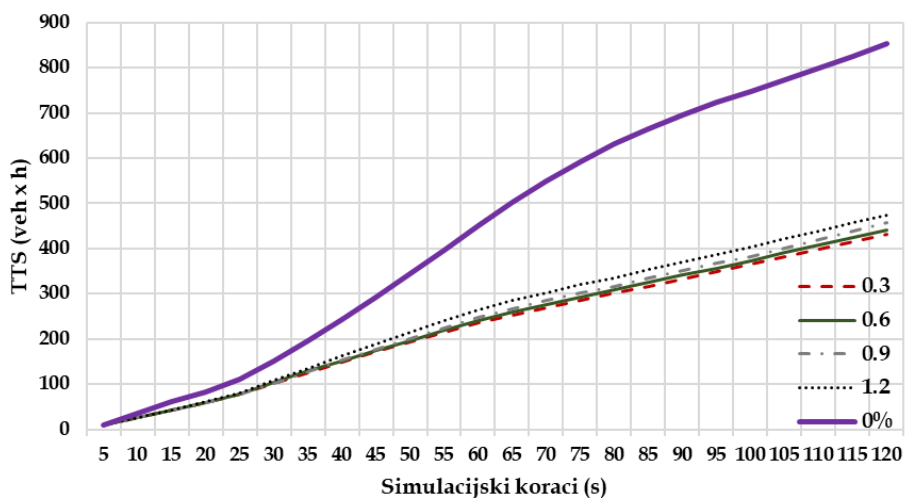
Graf 3 prikazuje kako se sa povećanjem  $\tau$  povećava ukupno vrijeme provedeno u simulaciji. Slične rezultate sa svim vrijednostima  $\tau$  postižu sve do 25 min. Tijekom cijelog trajanja simulacije, vrijednost parametra  $\tau$  od 0,3 do 0,9 međusobno ne stvaraju značajan utjecaj na stanje cestovne mreže. U odnosu na udio od 0% autonomnih vozila, 75% autonomnih vozila postižu pozitivan učinak na cestovnu mrežu sa svim vrijednostima  $\tau$ .



Graf 3. TTS - 75 % autonomnih vozila

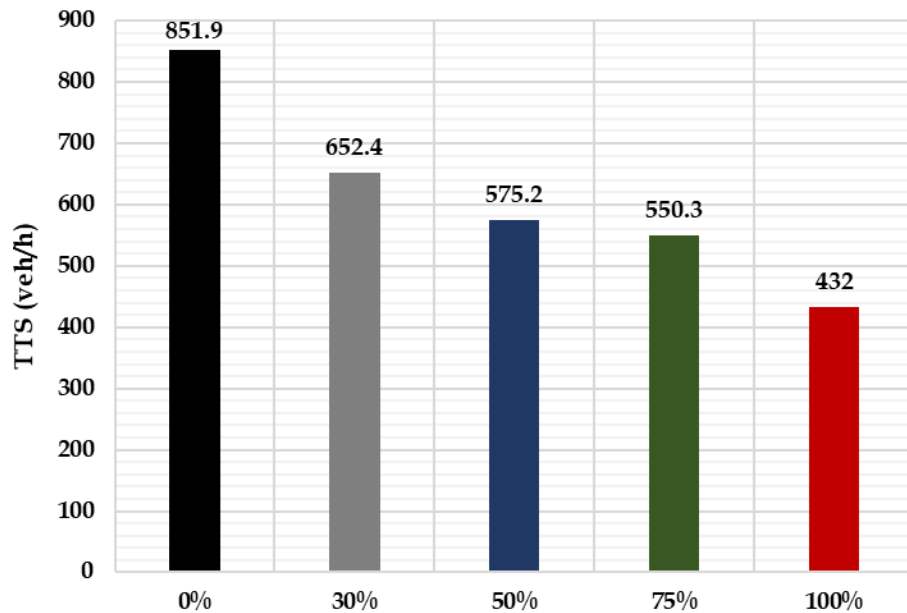


Graf 4 prikazuje kako se sa povećanjem  $\tau$  povećava ukupno vrijeme provedeno u simulaciji. Sa 100% udjela autonomnih vozila vidljiv je neznatčan utjecaj promjene parametra  $\tau$ . Sve vrijednosti parametra  $\tau$  postižu slične učinke na prometnu mrežu. U odnosu na udio od 0% autonomnih vozila, 100 % autonomnih vozila postižu duplo manju vrijednost TTS-a, a time i pozitivan učinak na cestovnu mrežu sa svim vrijednostima  $\tau$ .



Graf 4. TTS - 100% autonomnih vozila

Kako bi promotрили najbolji parametar  $\tau$  s ciljem postizanja najboljih prometnih parametara promotrit će se odnos  $\tau$  0,3 u svim udjelima postotka AV-a. Graf 5 prikazuje vrijednost  $\tau$  - 0,3 u svim promatranim scenarijima udjela autonomnih vozila. Vidljivo je da scenarij sa 100% udjelom AV u odnosu na 0 % AV je bolji za 97%. Promatrajući scenarij od 0 % AV također je vidljivo da je s udjelom AV od 30% scenarij bolji za 22%, sa udjelom AV od 50% bolji 48% te sa udjelom od 75% bolji za 55%.



Graf 5. TTS u odnosu na postotke AV-a

Nastavno na dobivene rezultate, može se zaključiti da je u promatranom scenariju vrijedi isti odnos između parametara, što je  $\tau$  vrijednost veća, povećava se ukupno vrijeme putovanja. Također vrijednosti 0,6 i 0,9 postižu gotovo iste rezultate, sa malom prednošću za 0,9.

## 5.2 Prosječno vrijeme putovanja vozila na mreži

MTT obilježava prosječno vrijeme putovanja na prometnoj mreži simulacije u simulacijskim koracima od 5min i može se prikazati izrazom:

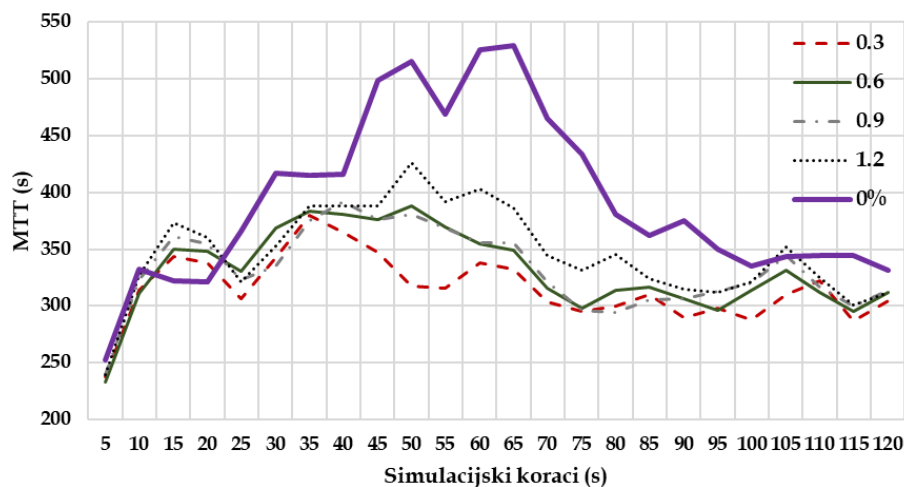
$$MTT = \sum_{i=0}^M d_i / \bar{v}_i \quad (4)$$

gdje je:

- $i \in \{0,1,2, \dots, M\}$  - indeks segmenta autoceste na glavnom toku;
- $M$  - broj segmenata autoceste na glavnom toku;

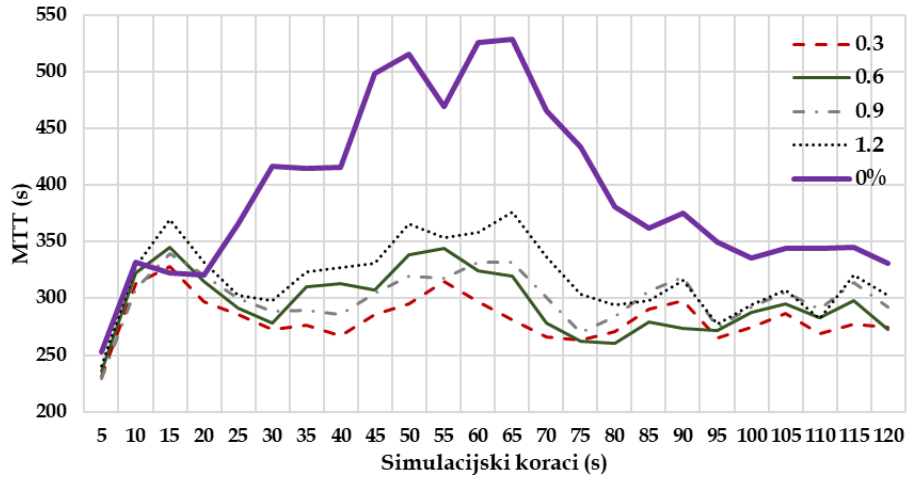
- $d_i$  – duljina  $i$ -tog segmenta autoceste na glavnom toku;
- $v_i$  – prosječna brzina na  $i$ -tom segmentu autoceste.

U nastavku teksta prikazani su svi scenariji udjela AV u odnosu na promjenu parametra  $\tau$ . Graf 6 prikazuje odnos MTT i svih vrijednosti parametra  $\tau$  te usporedni odnos sa scenarijem od 0% udjela AV-a. Iz grafa se može zaključiti da je smanjenjem parametra  $\tau$  postignut pozitivan utjecaj na stanje prometne mreže. Vidljivo je da vrijednosti  $\tau$  0,6 i 0,9 postiču gotovo iste rezultate u svim simulacijskim koracima, dok se kod vrijednosti od 0,3 može primijetiti smanjena vrijednost MTT-a, odnosno pozitivan utjecaj na cestovnu mrežu.



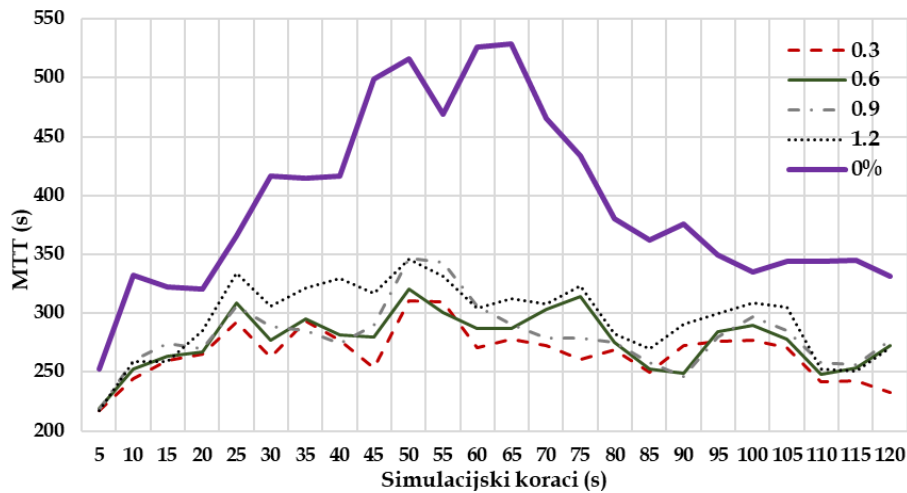
Graf 6. MTT - 30% autonomnih vozila

Graf 7 prikazuje odnos MTT i svih vrijednosti parametra  $\tau$  te usporedni odnos sa scenarijem od 0% udjela AV-a. Iz grafa se može zaključiti da je smanjenjem parametra  $\tau$  postignut pozitivan utjecaj na stanje prometne mreže. Svi parametri postiču pozitivan utjecaj na prometnu mrežu u odnosu na AV od 0%.



Graf 7. MTT - 50% autonomnih vozila

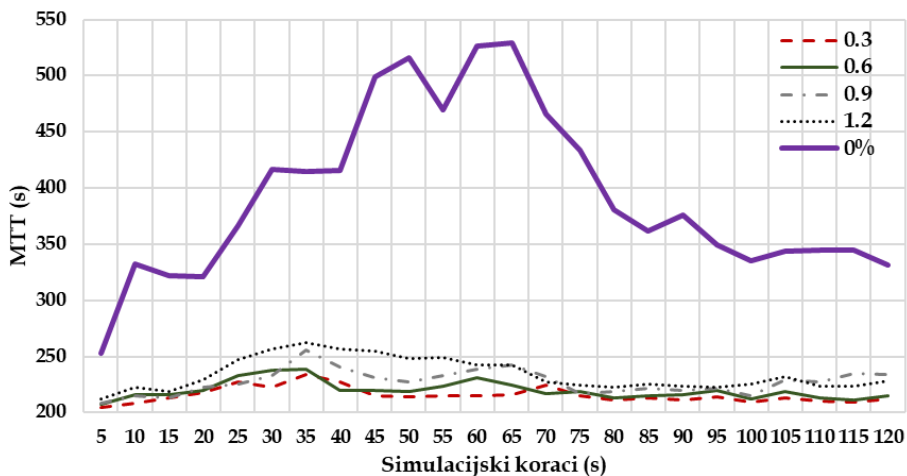
Graf 8 prikazuje odnos MTT i svih vrijednosti parametra  $\tau$  te usporedni odnos sa scenarijem od 0% udjela AV-a. Iz grafa se može zaključiti da je smanjenjem parametra  $\tau$  postignut pozitivan utjecaj na stanje prometne mreže. Svi parametri postižu pozitivan utjecaj na prometnu mrežu u odnosu na AV od 0%.



Graf 8. MTT - 75% autonomnih vozila

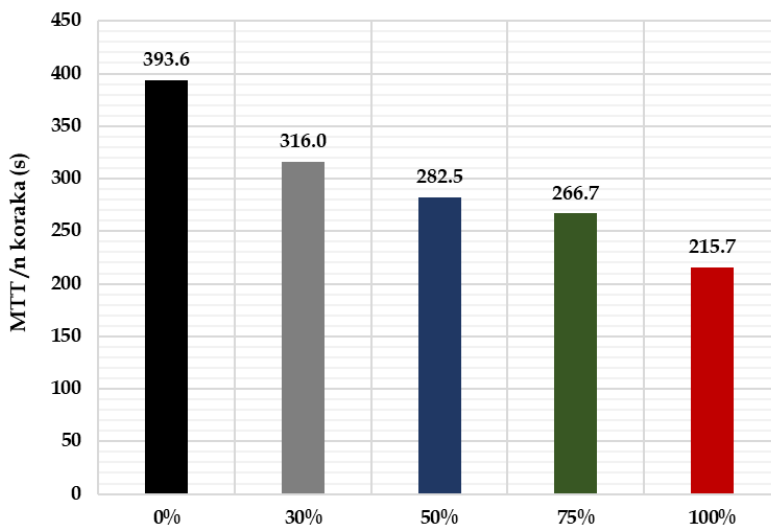
Graf 9 prikazuje odnos MTT i svih vrijednosti parametra  $\tau$  te usporedni odnos sa scenarijem od 0% udjela AV-a. Iz grafa se može zaključiti da je smanjenjem parametra  $\tau$

postignut pozitivan utjecaj na stanje prometne mreže. Svi parametri postižu pozitivan utjecaj na prometnu mrežu u odnosu na AV od 0%.



Graf 9. MTT - 100% autonomnih vozila

Graf 10 prikazuje međusoban odnos svih postotaka udjela AV-a sa vrijednosti  $\tau$  od 0,3s. Vidljivo je da je povećanjem udjela autonomnih vozila postignut bolji scenarij na cestovnoj mreži. Uvođenjem 100% udjela AV-a postiže se scenarij bolji za 84%.



Graf 10. Prosječna vrijednost MTT u odnosu na postotke AV-a

Nastavno na dobivene rezultate, može se zaključiti da je u promatranom scenariju vrijedi isti odnos između parametara, što je  $\tau$  vrijednost veća, povećava se ukupno vrijeme putovanja. Također je vidljiv odnos povećanja postotka autonomnih vozila postiže manju razliku utjecaja u promjeni  $\tau$ -a.

### 5.3 Prosječna brzina vozila na glavnom toku

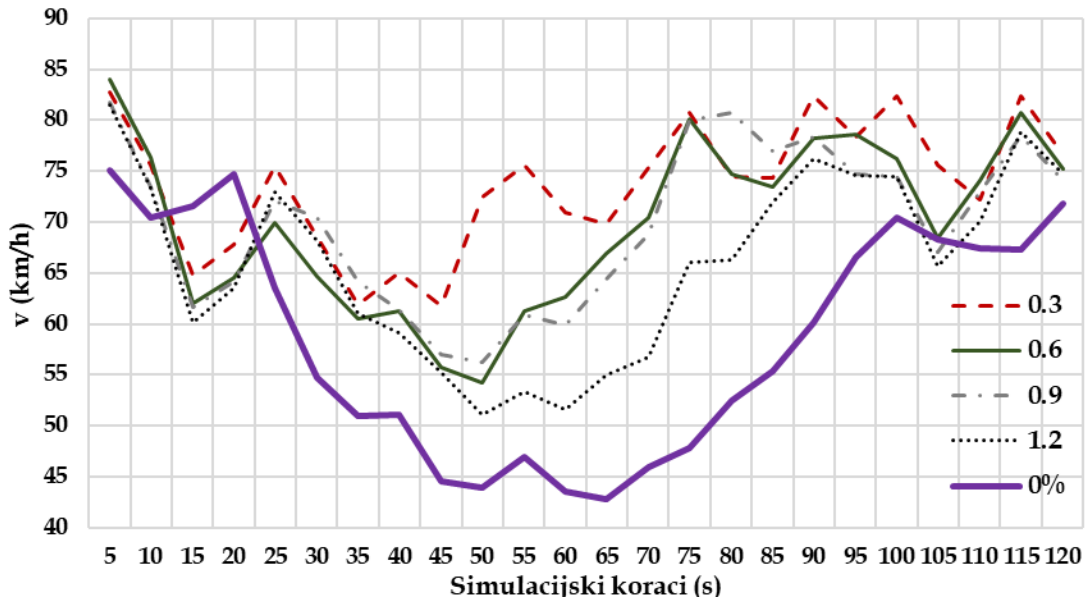
Srednja brzina  $\bar{v}$  prikazuje prosječnu brzinu kretanja svih vozila koja se nalaze na prometnom toku. Vrijednosti brzine prikazane su u svakom simulacijskom koraku od 5min i može se prikazati izrazom:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{j=0}^N v_j}{N} \quad (5)$$

gdje je:

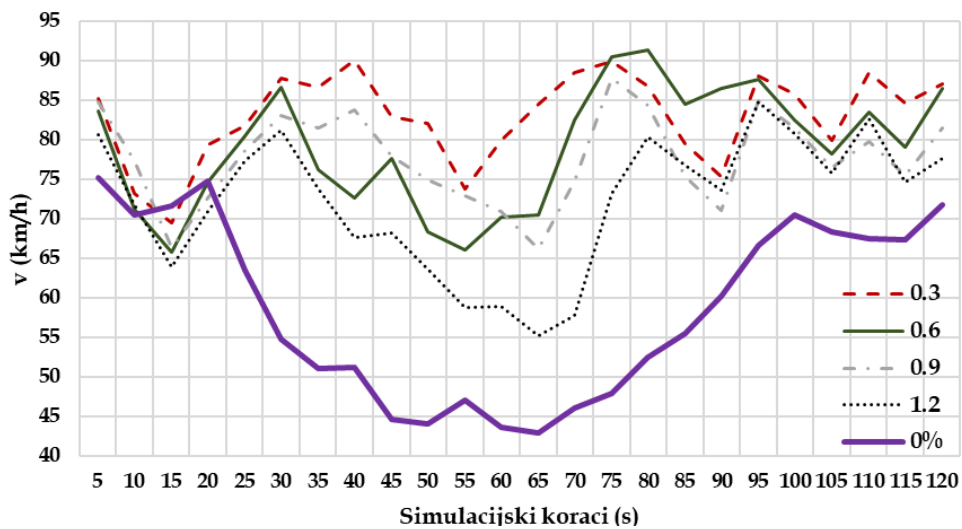
- $j \in \{0,1,2, \dots N\}$  – indeks vozila u mreži na glavnom toku autoceste;
- $v_j$  – brzina  $j$ -og vozila na glavnom toku autoceste;
- $N$ - ukupan broj vozila na mreži.

Graf 11 prikazuje vrijednosti  $\tau$  u scenariju od 30% autonomnih vozila. Vidljivo je kako je povećanjem vrijednosti  $\tau$  smanjena brzina na glavnom prometnom toku. Vrijednosti 0,6 i 0,9 postižu približno iste rezultate na prometni tok. Sve vrijednosti parametra  $\tau$  postižu pozitivan utjecaj na prometni tok u odnosu na scenarij sa 0% autonomnih vozila.



Graf 11. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 30% autonomnih vozila

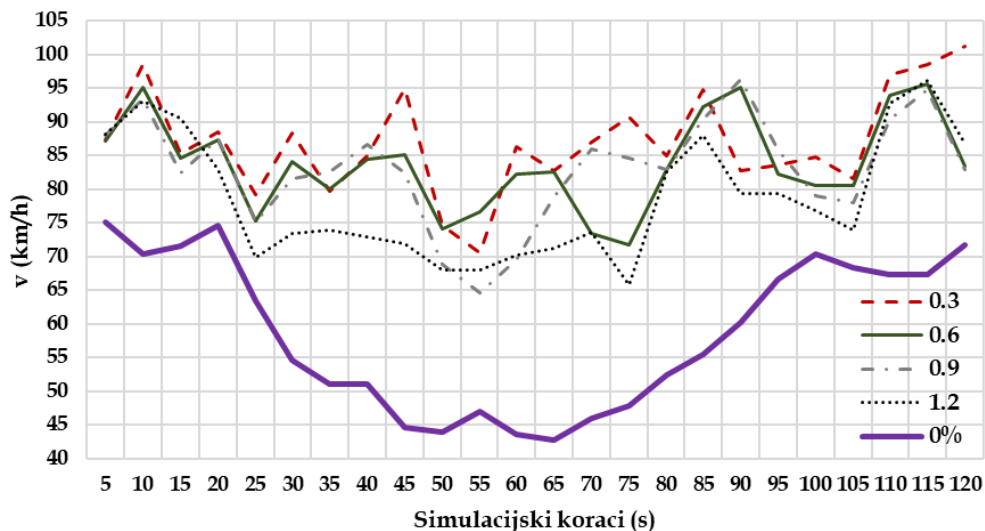
Graf 12 prikazuje odnos između prosječne brzine na prometnom toku i svih vrijednosti  $\tau$ . Vidljivo je da prema vrijednostima  $\tau$  se postiže jednak uzorak povećanja vrijednost  $\tau$ , odnosno smanjenja brzine na glavnom prometnom toku. Vidljivo je da se u udjelu AV-a od 50 % vidi jasnija razlika između vrijednosti 0,6 i 0,9, odnosno 0,6 pokazuje jasan pozitivan utjecaj na razvijanje brzine na glavnom prometnom toku.



Graf 12. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 50% autonomnih vozila

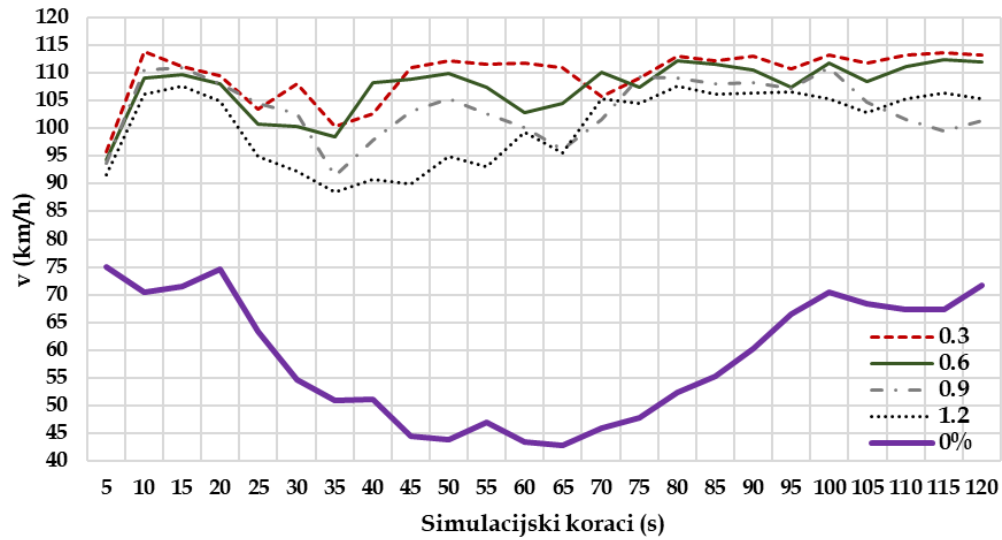


Graf 13 prikazuje vrijednosti  $\tau$  u scenariju od 75% AV-a. vidljiva je jasna prednost u podacima ukoliko je udio AV 50% u odnosu na 0% AV na prometnoj mreži. Povećanjem postotka AV smanjuje se razlika utjecaja razvijanja brzine kod vrijednosti  $\tau$  od 0,3, 0,6 i 0,9 no i dalje s prednosti u vrijednosti od 0,3 gdje je maksimalna postignuta brzina do 103km/h. Vrijednost 1,2 postiže mogućnost razvijanja manje brzine na glavnom prometnom toku.



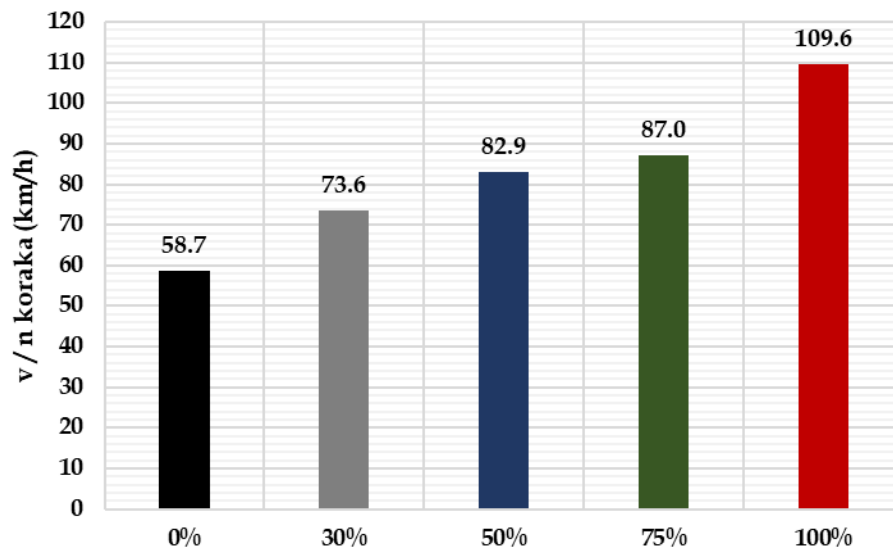
Graf 13. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 75% autonomnih vozila

Graf 14 prikazuje utjecaj svih vrijednosti  $\tau$  u scenariju udjela AV od 100%. Vidljivo je da se vrijednost 1,2 ističe u negativnom utjecaju na razvijanje brzina na glavom prometnom toku u maksimalnoj vrijednosti do 106km/h. S vrijednosti  $\tau$  od 0,3 postižu se maksimalne brzine do 114km/h. Vidljiv je znatno pozitivan utjecaj na prometnu mrežu sa udjelom autonomnih vozila od 100% u odnosu na sve vrijednosti  $\tau$ .



Graf 14. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 100 % autonomnih vozila

Graf 15 prikazuje sume vrijednosti  $\tau$  0,3 podijeljene sa brojem simulacijskih koraka kako bi se dobila prosječna vrijednost brzine za svaki scenarij udjela AV-a. Iz grafa je vidljivo da je povećanjem broja autonomnih vozila postignut pozitivan utjecaj na razvijanje brzine na glavnom prometnom toku. S udjelom AV od 100% vrijednost prosječne brzine povećala se za 87%.



Graf 15. Prosječna brzina vozila na glavnom toku u odnosu na postotke AV-a

Nastavno na dobivene rezultate, može se zaključiti da povećanjem vrijednosti  $\tau$  postiže se negativan utjecaj na prometni tok. Povećanjem udjela autonomnih vozila povećava se razlika utjecaja između vrijednosti 0,3-0,9 i 1,2, gdje 1,2 pokazuje veći negativan utjecaj na razvijanje brzine na glavnom prometnom toku.

#### 5.4 Prosječna gustoća prometa na glavnom toku

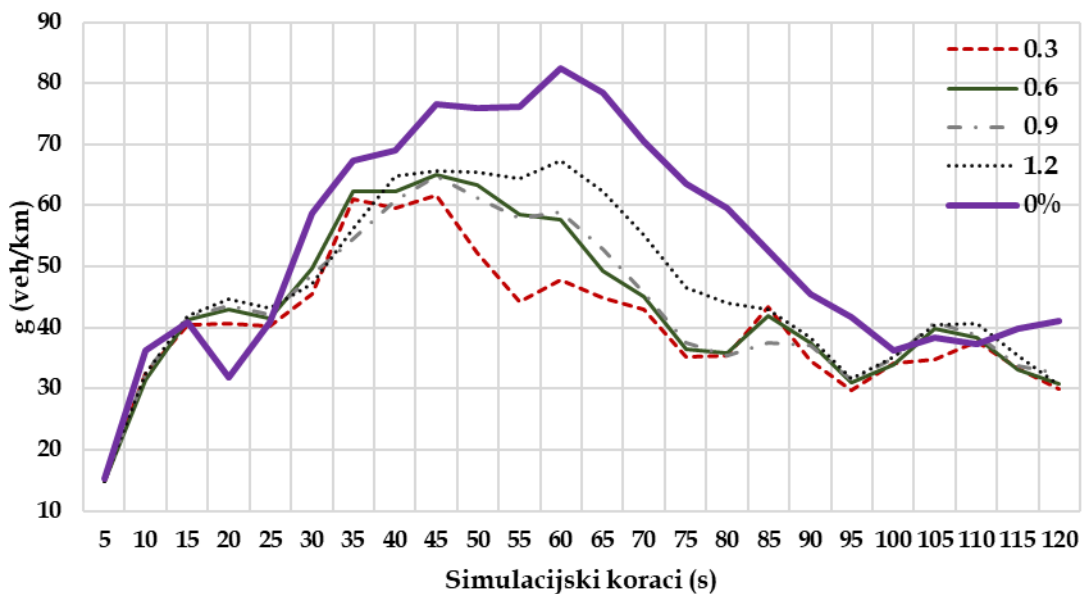
Prosječna gustoća  $\bar{g}$  prikazuje prosječnu gustoću svih vozila na glavnom prometnom toku u simulacijskim koracima od 5s i prikazuje se izrazom:

$$\bar{g} = \frac{N}{D} \quad (6)$$

gdje je:

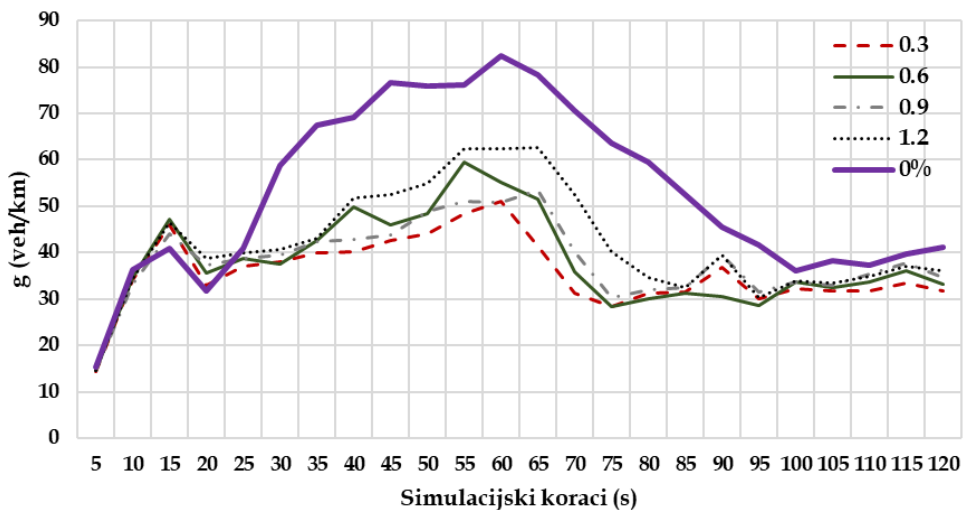
- $N$ - ukupan broj vozila na glavnom toku autoceste;
- $D$ - ukupna duljina autoceste.

Graf 16 prikazuje odnos vrijednosti  $g$  i svih vrijednosti  $\tau$  u scenariju od 30% AV-a. Vidljivo je da se povećanjem vrijednosti  $\tau$  postiže veća gustoća na prometnom toku. Vrijednosti 0,6 i 0,9 imaju sličan utjecaj na prometni tok, odnosno postižu sličnu vrijednost  $g$ . Svi  $\tau$  u scenariju od 30% pozitivno utječu na prometni tok u odnosu na scenarij od 0% autonomnih vozila.



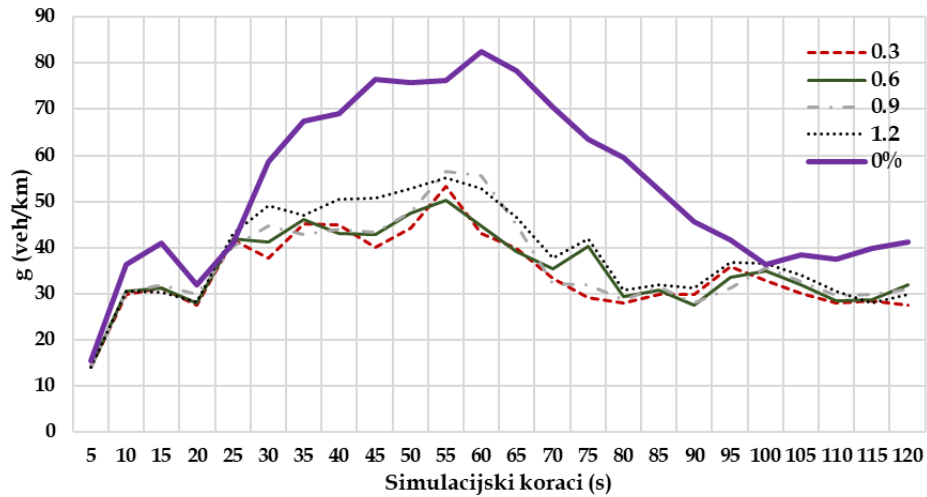
Graf 16. Prosječna gustoća - 30% autonomnih vozila

Graf 17 prikazuje odnos vrijednosti  $g$  i svih vrijednosti  $\tau$ . Može se zaključiti da je povećanjem vrijednosti  $\tau$  postignuta veća gustoća na glavnom prometnom toku. U scenariju od 50% AV, sve vrijednosti parametra  $\tau$  pozitivno utječu na prometni tok u odnosu na udio AV od 0%



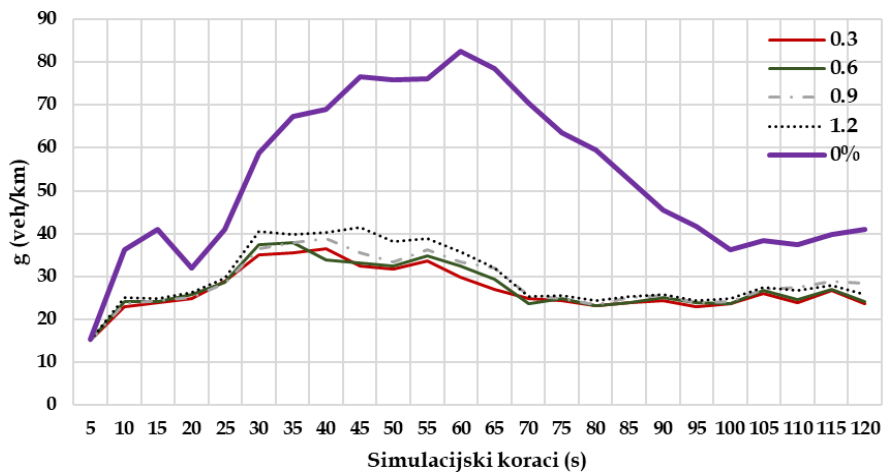
Graf 17. Prosječna gustoća - 50 % autonomnih vozila

Graf 18 prikazuje odnos vrijednosti  $g$  i svih parametara  $\tau$ . U grafu je vidljivo ponavljanje uzorka povećanja vrijednosti  $\tau$  i povećanja gustoće prometa. Odnos je proporcionalan. Može se zamijetiti pozitivan utjecaj povećanja udjela autonomnih vozila na prometnu mrežu.



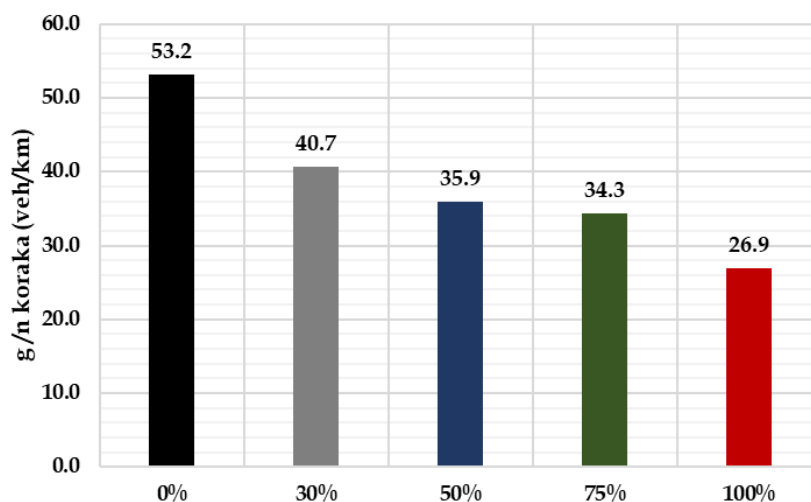
Graf 18. Prosječna gustoća - 75 % autonomnih vozila

Graf 19 prikazuje odnos vrijednosti  $g$  i svih parametara  $\tau$ . Može se zaključiti da povećanjem vrijednosti  $\tau$ , povećava se gustoća prometa. Također se može zaključiti jasna prednost u implementaciji većeg broja autonomnih vozila, te da se razlike utjecaja u vrijednostima parametra  $\tau$  od 0,3 do 0,9 znatno ne razlikuju.



Graf 19. Prosječna gustoća - 100% autonomnih vozila

Graf 20 prikazuje sume vrijednosti  $\tau$  0,3 podijeljene sa brojem simulacijskih koraka kako bi se dobila prosječna vrijednost gustoće za svaki scenarij udjela AV-a. Vidljivo je da se sa povećanjem udjela autonomnih vozila povećava gustoća na cestovnoj mreži. Razlog tome je što su AV međusobno usklađena povezana, odnosno voze prema istim načelima, a to im ujedno i omogućava razvijanje većih brzina.



Graf 20. Prosječna gustoća u odnosu na postotke AV-a

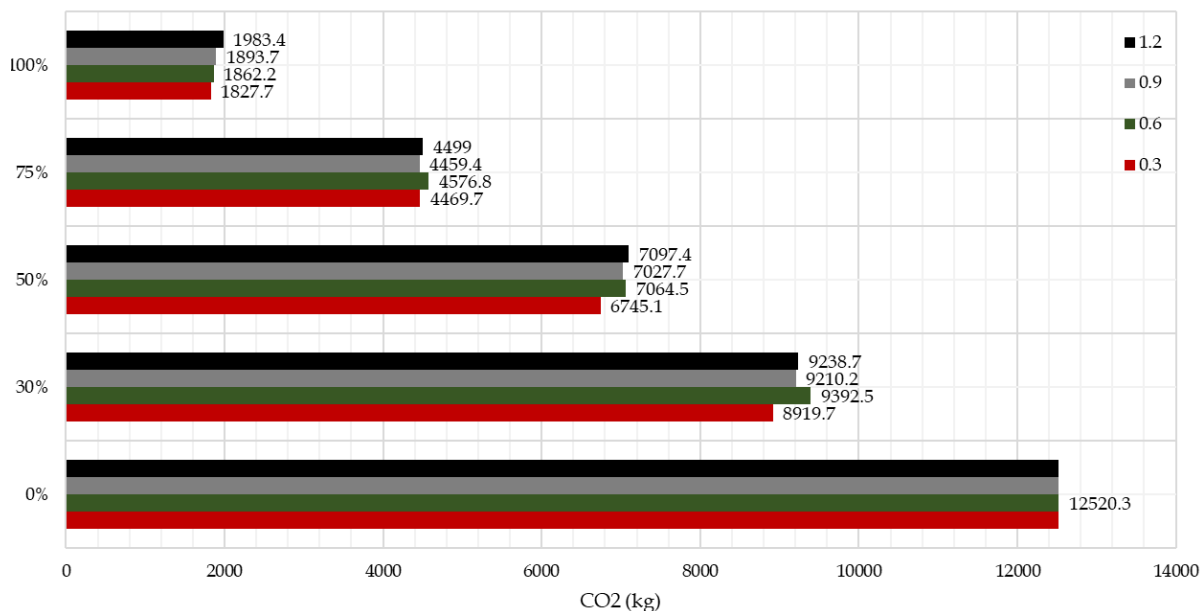
Nastavno na dobivene rezultate, može se zaključiti da povećanjem vrijednosti  $\tau$  postiže se negativan utjecaj na prometni tok. Povećanjem udjela autonomnih vozila povećava se razlika utjecaja između vrijednosti 0,3-0,9 i 1,2, gdje 1,2 pokazuje veći negativan utjecaj na razvijanje brzine na glavnom prometnom toku. Također, smanjivanjem razmaka između vozila, stvara se veća koncentracija vozila na jednom djelu prometnice, ali oslobađa ostale dijelove prometnice. Time se stvara mogućnost razvijanja željenih brzina, što smanjuje vrijeme zadržavanja na prometnici te smanjuje stvaranja zagušenja.

## 5.5 Ispušni plinovi

U istraživanju se također promatrao utjecaj autonomnih vozila na okoliš, odnosno utjecaj promjene parametara vrijednosti  $\tau$  na ispušne plinove. Tijekom simulacije pomoću

TraCI i Python skripte također su se očitavale vrijednosti ispušnih plinova: CO<sub>2</sub> (kg), PMX (g) i CO(kg). AV vozila su električna te time smanjuju negativan ekološki utjecaj. U nastavku teksta prikazane su vrijednosti svih ispušnih plinova u odnosu na scenarije i vrijednosti parametra  $\tau$ .

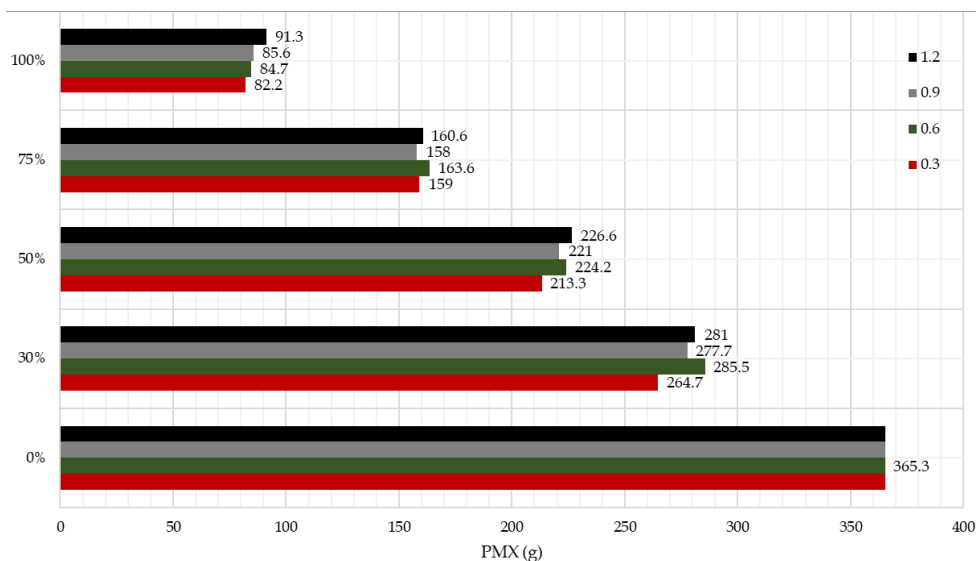
Graf 21 prikazuje vrijednosti svih scenarija udjela autonomnih vozila te sve vrijednosti  $\tau$  u svim scenarijima zasebno. Može se zaključiti da povećanjem udjela autonomnih vozila u prometni tok, smanjuje se udio ispušnog plina CO<sub>2</sub>. Najbolji utjecaj ima parametar 0,3 u svim scenarijima. Vrijednost CO<sub>2</sub> u scenariju od 100%,  $\tau - 0,3$  smanjen je za 15% u odnosu na scenarij sa udjelom AV od 0% jer su u mreži i dalje prisutna vozila: autobusi i kamioni koja nisu električna vozila. U scenariju sa 100 % AV vrijednost CO<sub>2</sub> u 0,3 u odnosu na 1,2 je manja za 8%. Može se primijetiti negativan utjecaj vrijednosti 0,6 u scenarijima sa 75% AV i manje.



Graf 21. Vrijednosti CO<sub>2</sub> na prometnoj mreži

Graf 22 prikazuje sve vrijednosti parametra  $\tau$  u svim scenarijima udjela autonomnih vozila. Vidljivo je da s povećanjem udjela autonomnih vozila, smanjuje se koncentracija PMX-a. Vrijednost PMX-a u scenariju od 100% AV i vrijednosti  $\tau$  0,3 u

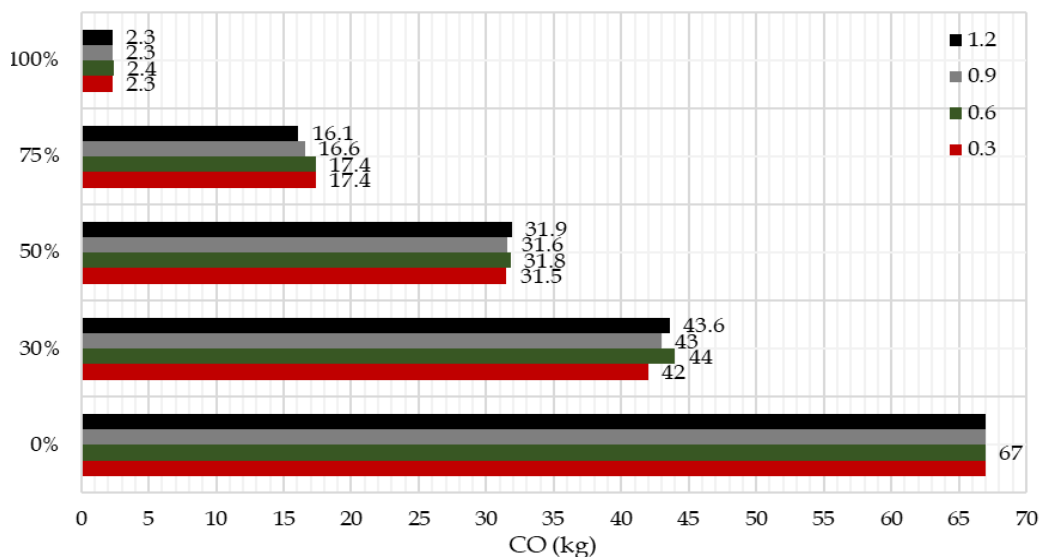
odnosu na scenarij sa 0% AV je manji za 78%. Odnosno u scenariju sa 100% AV, parametar 0,3 je za 10% bolji u odnosu na parametar 1,2. U svim scenarijima od 75% AV i manje vidljiv je negativan ekološki utjecaj parametra 0,6 u odnosu na ostale vrijednosti parametra  $\tau$ .



Graf 22. Vrijednost PMX na prometnoj mreži

Graf 23 prikazuje vrijednosti CO (kg) u ovisnosti o promjeni udjela AV i promjene parametra  $\tau$ . Povećanjem udjela AV smanjuje se udio CO. Odnosno scenarij sa 100% AV bolji je za 97 %. Vidljivo je da u scenariju sa 30% AV najnegativniji utjecaj stvara parametar 0,6, odnosno najbolji 0,3. U scenariju od 75% AV najnegativniji utjecaj postiže se sa vrijednosti 0,3, odnosno najbolji sa vrijednosti 1,2. Takva pojava je prisutna zbog mogućnosti razvijanja većih brzina na prometnici a time i povećanjem ispušnih plinova.



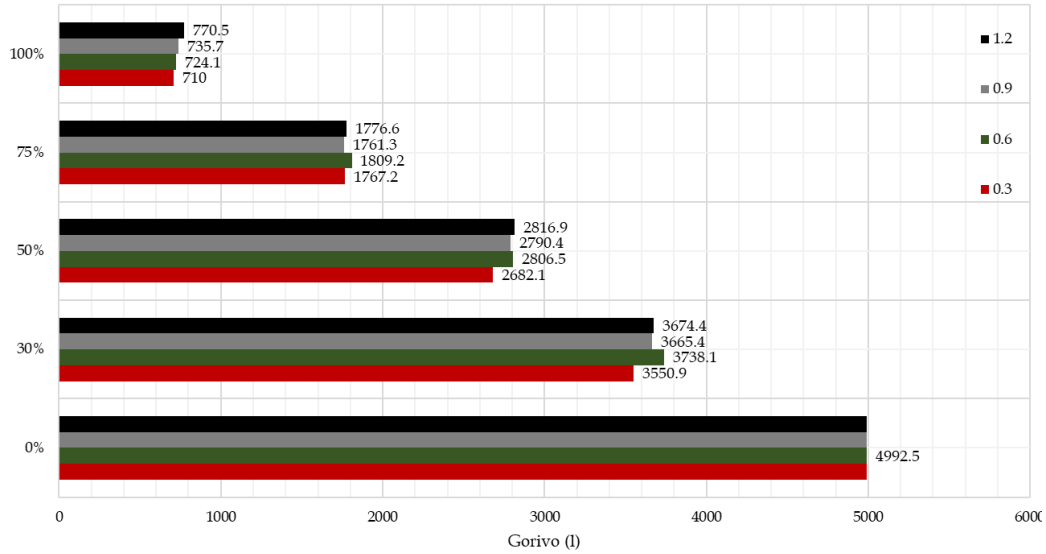


Graf 23. Vrijednost CO na prometnoj mreži

## 5.6 Potrošnja energije

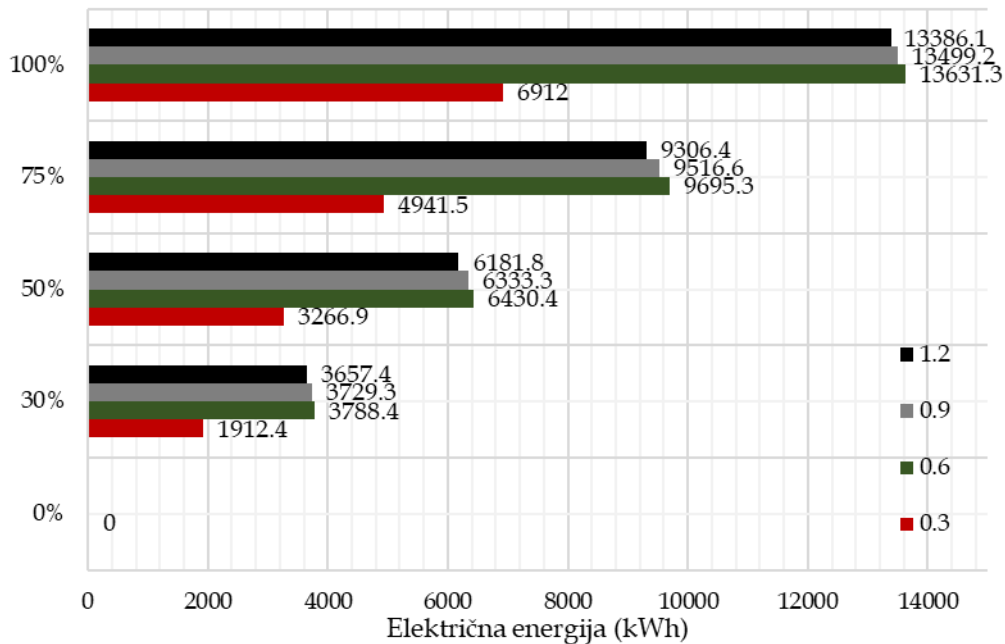
Prilikom simuliranja prometnog modela iščitavane su promjene u potrošnji goriva u ovisnosti o udjelu autonomnih vozila i promjeni parametra  $\tau$ . Za električna vozila zabilježena je potrošnja električne energije kroz vrijeme trajanja simulacije. U nastavku teksta prikazani su grafovi sa vrijednostima potrošnje goriva i električne energije u ovisnosti promjene parametra  $\tau$  i udjela AV vozila u prometnom toku.

Graf 24 prikazuje vrijednosti potrošnje goriva u cijelom trajanju simulacije od 12 s. Prikazani su svi scenariji u svim vrijednostima  $\tau$ . Povećanjem udjela autonomnih vozila smanjuje se potrošnja goriva. No, s obzirom da se smanjuje udio vozila sa motorom na unutarnje izgaranje takva pojava je opravdana.



Graf 24. Vrijednost potrošnje goriva ostvarenog na prometnoj mreži

Graf 25 prikazuje vrijednosti električne energije, gdje se može zaključiti da sa povećanjem udjela AV se povećava vrijednost električne energije. Koristeći vrijednost 0,3 u svim scenarijima bi se postigla znatna prednost u potrošnji el. energije.

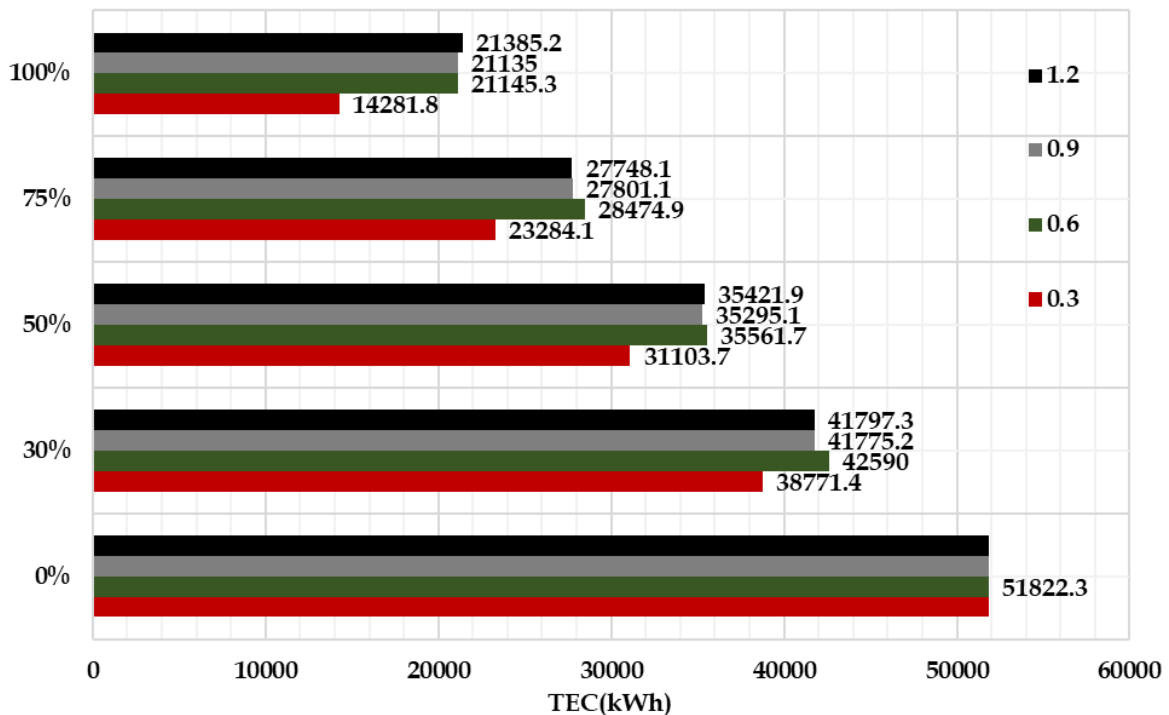


Graf 25. Vrijednost električne energije ostvarene na cestovnoj mreži

S obzirom da je prirodan rezultat da se povećanjem AV povećava električna energija, odnosno smanjuje potrošnja goriva, potrebno je prikazati TEC neovisno o pogonskom tipu. Kako bi se dobila jednakost između tih vrijednosti koristi se formula:

$$TEC = \sum_{i=1}^n ELC_i + \sum_{j=1}^m (FD_j \times 10.96) + \sum_{k=1}^o (FB_k \times 9.61) \quad (7)$$

Pomoću formule dobivena je vrijednost TEC tijekom trajanja simulacije za sva vozila, neovisno o pogonu vozila. Potrošnja se promatra kroz sve scenarije i sve vrijednosti parametra  $\tau$ . Graf 26 prikazuje vrijednosti TEC.



Graf 26. Vrijednost TEC ostvarenog na prometnoj mreži

Iz grafa se zaključiti da je povećanjem udjela AV, smanjena ukupna vrijednost energije u prometnom toku. Sa udjelom od 75% AV na manje, vrijednost  $\tau$  0,6 povećava udio TEC u odnosu na ostale vrijednosti  $\tau$ -a, što dovodi do zaključka da  $\tau$  0,6 stvara negativan učinak u kombinaciji s konvencionalnim vozilima ručnog upravljanja. U

scenariju sa 100% AV, pozitivan učinak stvara vrijednost  $\tau$  od 0,3. U odnosu na scenarij od 0% smanjen je TEC za 73%.

## 6 Zaključak

Cestovni promet je prometna grana koja svojom prirodnom ekspanzijom stvara izazove u kretanju svih sudionika cestovne infrastrukture, kako sa stajališta sigurnosti tako i uslužnosti. Iako, fokusom na cestovnu infrastrukturu te njezinim unapređenjem se povećava kvaliteta odvijanja cestovnog prometa, potrebno je fokusirati se na prometne entitete. Temeljem činjenice da su korisnici cestovne infrastrukture ljudi, uzimamo u obzir učestalost ljudskih grešaka koje stvaraju nesavršen, heterogeni, neusklađeni prometni tok. Autonomna vozila, koja preuzimaju ulogu vozača kada je riječ osobno vozilo kao sredstvo prijevoza, mogu zanemariti ljudsku grešku te doprinijeti kvaliteti odvijanja cestovnog prometa postizanjem potpuno harmoniziranog prometnog toka kao rezultat.

Autonomna vozila imaju 6 stupnjeva autonomnosti u rasponu od 0 do 5, gdje je pet obilježava potpuno autonomno vozilo. Potpuna automatizacija podrazumijeva da vozač ne upravlja vozilom te potpunu kontrolu posjeduje sustav vozila. Vozilo je programirano da postupa u skladu sa situacijama sa kojima se susreće, odnosno da u potpunosti samostalno koči, manevrira, daje signale drugim sudionicima u prometu, prepoznaje situacije u kojima je moguća smanjena sigurnost te reagira u skladu sa zahtjevima okoline. Autonomna vozila koja su se uzimala u obzir prilikom izrade simulacije su potpuno autonomna vozila.

Kako bi se prometni problemi efikasnije, brže i ekonomičnije promotrili te pronašlo optimalno rješenje koriste se simulacijski alati za izradu i prikaz prometne situacije odnosno prometnog rješenja. Simulacijski alati su softveri koji se koriste na računalu. Kako bi se prikazao detaljizirani model prometne situacije koriste se mikrosimulacijski alati, a jedni od njih su SUMO, AIMSUN i VISSIM. Iako je jasna njihova sličnost i jednaka namjena, svaki od njih ima svoje pojedinosti koje su prioritizirane prema potrebi korisnika, odnosno prometnog stručnjaka. U ovome radu korišten je mikrosimulacijski alat SUMO.

U mikrosimulacijskom alatu SUMO definirani su ulazni parametri koji opisuju tipove vozila te kretanja vozila. Ulazni parametri definirani su prema prethodnim istraživanjima. Parametri koji su varijabilni su udio autonomnih vozila u prometnom toku te vremenski razmak između vozila. Prema izlaznim rezultatima simulacije može se zaključiti da autonomna vozila pozitivno utječu na prometni tok. Ukoliko su na prometnici prisutna AV u udjelu od 100% postignuta je potpuna harmonizacija prometnog toka. Takva pojava pozitivno utječe na odvijanje prometnog toka ali i na ekološki aspekt. Ukoliko je udio AV 50-75%, pozitivan utjecaj na prometni tok se smanjuje no i dalje postižući pozitivne rezultate, odnosno ukoliko na prometnici nisu prisutna AV postiže se rezultat znatno lošiji u odnosu na prometni tok sa udjelom AV od 30%. Zaključno tome, povećanjem udjela AV postiže se pozitivan utjecaj na kretanje prometnog toka.

## Literatura

- [1] H. U. Ahmed, Y. Huang, and P. Lu, "A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-Simulation," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 314–335, Mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010019.
- [2] A. Karbasi and S. O'Hern, "Investigating the Impact of Connected and Automated Vehicles on Signalized and Unsignalized Intersections Safety in Mixed Traffic," *Future Transportation*, vol. 2, no. 1, pp. 24–40, Jan. 2022, doi: 10.3390/futuretransp2010002.
- [3] J. Talamini, A. Bartoli, A. de Lorenzo, and E. Medvet, "On the impact of the rules on autonomous drive learning," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, Apr. 2020, doi: 10.3390/app10072394.
- [4] F. Vrbanić, M. Miletić, L. Tišljarić, and E. Ivanjko, "Influence of Variable Speed Limit Control on Fuel and Electric Energy Consumption, and Exhaust Gas Emissions in Mixed Traffic Flows," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, p. 932, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020932.
- [5] D. Li and P. Wagner, "A Novel Approach for Mixed Manual/Connected Automated Freeway Traffic Management," *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1757, Mar. 2020, doi: 10.3390/s20061757.
- [6] F. Vrbanić, M. Miletić, L. Tišljarić, and E. Ivanjko, "Influence of Variable Speed Limit Control on Fuel and Electric Energy Consumption, and Exhaust Gas Emissions in Mixed Traffic Flows," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, p. 932, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020932.

- [7] M. Martínez-Díaz and F. Soriguera, "Autonomous vehicles: Theoretical and practical challenges," in *Transportation Research Procedia*, Jan. 2018, vol. 33, pp. 275–282. doi: 10.1016/j.trpro.2018.10.103.
- [8] R. Patel, M. W. Levin, and S. D. Boyles, "Effects of Autonomous Vehicle Behavior on Arterial and Freeway Networks," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2561, no. 1, pp. 9–17, Jan. 2016, doi: 10.3141/2561-02.
- [9] "SAE International." <https://www.sae.org/> (accessed Jun. 20, 2022).
- [10] M. Raza, "Autonomous Vehicles: Levels, Technologies, Impacts and Concerns," 2018. Accessed: Jun. 03, 2022. [Online]. Available: <http://www.ripublication.com>
- [11] "Road safety: Commission welcomes agreement on new EU rules to help save lives." [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_19\\_1793](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_1793) (accessed Jun. 03, 2022).
- [12] J. Zhao, B. Liang, and Q. Chen, "The key technology toward the self-driving car," *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, vol. 6, no. 1. Emerald Group Publishing Ltd., pp. 2–20, 2018. doi: 10.1108/IJIUS-08-2017-0008.
- [13] R. Grau and J. Darcelo, "GETRAM: A Generic Environment for Traffic Analysis and Modeling," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 27, no. 12, pp. 701–706, Aug. 1994, doi: 10.1016/s1474-6670(17)47554-9.
- [14] H. Xiao, R. Ambadipudi, J. Hourdakis, and P. Michalopoulos, "HUMAN-CENTERED TECHNOLOGY TO ENHANCE SAFETY AND MOBILITY Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation



- of AIMSUN and VISSIM Final Report,” May 2005. Accessed: Jun. 04, 2022. [Online]. Available: <http://www.cts.umn.edu/pdf/CTS-05-05.pdf>
- [15] “PTV VISSIM - Wikipedia.” [https://en.wikipedia.org/wiki/PTV\\_VISSIM](https://en.wikipedia.org/wiki/PTV_VISSIM) (accessed Sep. 04, 2022).
- [16] “electronic library - SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview.” <https://elib.dlr.de/71460/> (accessed Jun. 04, 2022).
- [17] “Vehicle Type Parameter Defaults - SUMO Documentation.” [https://sumo.dlr.de/docs/Vehicle\\_Type\\_Parameter\\_Defaults.html](https://sumo.dlr.de/docs/Vehicle_Type_Parameter_Defaults.html) (accessed Sep. 04, 2022).
- [18] F. Vrbanić, M. Miletić, L. Tišljarić, and E. Ivanjko, “Influence of Variable Speed Limit Control on Fuel and Electric Energy Consumption, and Exhaust Gas Emissions in Mixed Traffic Flows,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14020932.
- [19] F. Vrbanic, E. Ivanjko, S. Mandzuka, and M. Miletic, “Reinforcement learning based variable speed limit control for mixed traffic flows,” in *2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2021*, Jun. 2021, pp. 560–565. doi: 10.1109/MED51440.2021.9480215.

## Popis slika

Slika 1. Stupnjevi autonomne vožnje [10].....	6
Slika 2. Korisničko sučelje simulacijskog alata AIMSUN [14].....	12
Slika 3. Korisničko sučelje simulacijskog alata VISSIM[15] .....	14
Slika 4. Korisničko sučelje simulacijskog alata SUMO .....	15
Slika 5. Shematski prikaz autoceste korištene za simulaciji.....	16

## Popis grafikona

Graf 1. TTS - 30%autonomnih vozila.....	22
Graf 2. TTS - 50 % autonomnih vozila.....	23
Graf 3. TTS - 75 % autonomnih vozila.....	23
Graf 4. TTS - 100% autonomnih vozila.....	24
Graf 5. TTS u odnosu na postotke AV-a .....	25
Graf 6. MTT - 30% autonomnih vozila.....	26
Graf 7. MTT - 50% autonomnih vozila.....	27
Graf 8. MTT - 75% autonomnih vozila.....	27
Graf 9. MTT - 100% autonomnih vozila.....	28
Graf 10. Prosječna vrijednost MTT u odnosu na postotke AV-a.....	28
Graf 11. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 30% autonomnih vozila .....	31
Graf 12. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 50% autonomnih vozila .....	31
Graf 13. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 75% autonomnih vozila .....	32
Graf 14. Prosječna brzina vozila na glavnom toku - 100 % autonomnih vozila ...	33
Graf 15. Prosječna brzina vozila na glavnom toku u odnosu na postotke AV-a ..	33
Graf 16. Prosječna gustoća - 30% autonomnih vozila .....	35
Graf 17. Prosječna gustoća - 50 % autonomnih vozila .....	35
Graf 18. Prosječna gustoća - 75 % autonomnih vozila .....	36
Graf 19. Prosječna gustoća - 100% autonomnih vozila .....	36
Graf 20. Prosječna gustoća u odnosu na pstotke AV-a.....	37
Graf 21. Vrijednosti CO2 na prometnoj mreži .....	38
Graf 22. Vrijednost PMX na prometnoj mreži.....	39
Graf 23. Vrijednost CO na prometnoj mreži .....	40
Graf 24. Vrijednost potrošnje goriva ostvarenog na prometnoj mreži.....	41
Graf 25. Vrijednost električne energije ostvarene na cestovnoj mreži.....	41
Graf 26. Vrijednost TEC ostvarenog na prometnoj mreži .....	42

## Popis tablica

Tablica 1. Simulacijski parametri vozila .....	17
Tablica 2. Simulacijski parametri prometnog toka.....	18
Tablica 3. Prikaz mjerenih vrijednosti rezultata simulacije s različitim udjelom autonomnih vozila.....	20

## Popis kratica

<b>SUMO</b>	Simulation of Urban MObility
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>ADAS</b>	Advanced Driver-Assistance System
<b>EM</b>	Elektronička mapa
<b>TTV</b>	teških teretnih vozila
<b>INS</b>	Internal Navigation System
<b>PTV</b>	Planung Transport Verkehr
<b>AIMSUN</b>	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks
<b>GETRAM</b>	Generic Environment for TRaffic Analysis and Modeling
<b>OD</b>	Origin-Destination
<b>PTV</b>	Planung Transport Verkher
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt
<b>TraCI</b>	Traffic Control Interface
<b>TTS</b>	Total Time Spent
<b>MTT</b>	Mean Travel Time
<b>TEC</b>	Total Energy Consumption

# Prilog A: Simulacijski parametri

## A1. Parametri vozila

```
<vType id="CARb" accel="2.6" lcKeepRight="0" departSpeed="36.11" maxSpeed="60.00" sigma="0.7"
speedDev="0.2" speedFactor="1" tau="1.1" emissionClass="HBEFA3/PC_G_EU5"/>
<vType id="CARD" accel="2.6" lcKeepRight="0" departSpeed="36.11" maxSpeed="60.00" sigma="0.7"
speedDev="0.2" speedFactor="1" tau="1.1" emissionClass="HBEFA3/PC_D_EU5"/>
<vType id="Bus" vClass="coach" departSpeed="27.78" emissionClass="HBEFA3/Coach"/>
<vType id="Truck" vClass="trailer" length="16.5" departSpeed="25" accel="1.1" maxSpeed="25"
emissionClass="HBEFA3/HDV_D_EU5"/>
<vType id="CAV" accel="2.6" departSpeed="36.11" lcKeepRight="0" maxSpeed="60.00" sigma="0" speedDev="0.05"
speedFactor="1" tau="0.5" emissionClass="Energy">
  <param key="has.battery.device" value="true"/>
  <param key="maximumBatteryCapacity" value="77000"/>
  <param key="maximumPower" value="150000"/>
  <param key="vehicleMass" value="1850"/>
  <param key="frontSurfaceArea" value="2.9"/>
  <param key="airDragCoefficient" value="0.27"/>
  <param key="internalMomentOfInertia" value="0.01"/>
  <param key="radialDragCoefficient" value="0.5"/>
  <param key="rollDragCoefficient" value="0.07"/>
  <param key="constantPowerIntake" value="100"/>
  <param key="propulsionEfficiency" value="0.9"/>
  <param key="recuperationEfficiency" value="0.65"/>
  <param key="stoppingTreshold" value="0.1"/>
</vType>
```

## A3. Parametri prometnog toka

```
<flow begin="0.00" color="yellow" end="1200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0" id="GLAVNI_TOK1b"
to="E7" type="CARb" vehsPerHour="776" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="1200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK1d" to="E7" type="CARD" vehsPerHour="1029" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="1200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK1C" to="E7" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="1200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK1bus" to="E7" type="Bus" vehsPerHour="19" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="1200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK1truck" to="E7" type="Truck" vehsPerHour="76" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK_S1b" to="E9" type="CARb" vehsPerHour="123" via="E1 E2 E3 E4" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK_S1d" to="E9" type="CARD" vehsPerHour="162" via="E1 E2 E3 E4" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK_S1C" to="E9" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E1 E2 E3 E4" />
<flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK_S1Cbus" to="E9" type="Bus" vehsPerHour="3" via="E1 E2 E3 E4" />
```

```

    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK_S1Ctruck" to="E9" type="Truck" vehsPerHour="12" via="E1 E2 E3 E4" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8"
id="R1_GLAVNI_TOKb" to="E7" type="CARb" vehsPerHour="123" via="E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8"
id="R1_GLAVNI_TOKd" to="E7" type="CARD" vehsPerHour="162" via="E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8"
id="R1_GLAVNI_TOKC" to="E7" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8"
id="R1_GLAVNI_TOKCbus" to="E7" type="Bus" vehsPerHour="3" via="E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8"
id="R1_GLAVNI_TOKCtruck" to="E7" type="Truck" vehsPerHour="12" via="E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8" id="R1_S1b"
to="E9" type="CARb" vehsPerHour="41" via="E2 E3 E4" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8" id="R1_S1d"
to="E9" type="CARD" vehsPerHour="54" via="E2 E3 E4" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8" id="R1_S1C"
to="E9" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E2 E3 E4" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8" id="R1_S1Cbus"
to="E9" type="Bus" vehsPerHour="1" via="E2 E3 E4" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E8" id="R1_S1Ctruck"
to="E9" type="Truck" vehsPerHour="4" via="E2 E3 E4" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E10"
id="R2_GLAVNI_TOKb" to="E7" type="CARb" vehsPerHour="452" via="E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E10"
id="R2_GLAVNI_TOKd" to="E7" type="CARD" vehsPerHour="598" via="E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E10"
id="R2_GLAVNI_TOKC" to="E7" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E10"
id="R2_GLAVNI_TOKCbus" to="E7" type="Bus" vehsPerHour="10" via="E6 E61" />
    <flow begin="0.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="0" from="E10"
id="R2_GLAVNI_TOKCtruck" to="E7" type="Truck" vehsPerHour="40" via="E6 E61" />
    <flow begin="1200.00" color="yellow" end="3600.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK2b" to="E7" type="CARb" vehsPerHour="1144" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="1200.00" color="yellow" end="3600.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK2d" to="E7" type="CARD" vehsPerHour="1516" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="1200.00" color="yellow" end="3600.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK2C" to="E7" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="1200.00" color="yellow" end="3600.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK2Cbus" to="E7" type="Bus" vehsPerHour="28" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="1200.00" color="yellow" end="3600.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK2Ctruck" to="E7" type="Truck" vehsPerHour="112" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="3600.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK3b" to="E7" type="CARb" vehsPerHour="776" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="3600.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK3d" to="E7" type="CARD" vehsPerHour="1029" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="3600.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK3C" to="E7" type="CAV" vehsPerHour="0" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="3600.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK3Cbus" to="E7" type="Bus" vehsPerHour="19" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />
    <flow begin="3600.00" color="yellow" end="7200.00" departLane="free" departPos="free" from="E0"
id="GLAVNI_TOK3Ctruck" to="E7" type="Truck" vehsPerHour="76" via="E1 E2 E3 E4 E5 E6 E61" />

```

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Diplomski rad

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_

*(vrsta rada)*

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Analiza utjecaja autonomnih vozila na ponašanje prometnog toka na autocestama, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 09.09.2022.

Lidija Babić

*(ime i prezime, potpis)*