

Programska podrška za simulacije prometnih tokova na autocestama

Širanović, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:119:643609>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Matija Širanović

**PROGRAMSKA PODRŠKA ZA SIMULACIJU PROMETNIH
TOKOVA NA AUTOCESTAMA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

**PROGRAMSKA PODRŠKA ZA SIMULACIJU PROMETNIH
TOKOVA NA AUTOCESTAMA**

**SOFTWARE FOR SIMULATING TRAFFIC FLOWS ON
MOTORWAYS**

Mentor: prof. dr. sc. tech. Edouard Ivanjko

Komentor: Filip Vrbanić, mag. ing. traff.

Student: Matija Širanović

JMBAG: 0135245769

Zagreb, rujan 2024.

Zagreb, 30. travnja 2024.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Računalstvo**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7504

Pristupnik: **Matija Širanović (0135245769)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Programska podrška za simulacije prometnih tokova na autocestama**

Opis zadatka:

Simulacije su vrlo bitne za analizu novih prometnih rješenja kao i za analizu ponašanja novih mješovitih prometnih tokova cestovnih vozila. Pri tome se autoceste ističu kao jedan značajan slučaj za analizu utjecaja povećanog udjela novih umreženih autonomnih vozila. Posebno ako su dostupni izmjereni stvarni podatci o količini prometa kod koje se u budućnosti može očekivati sve veći udjel umreženih autonomnih vozila te kako postojeći mikroskopski simulatori imaju ugrađene modele ponašanja takvih vozila. Pri tome je bitno analizirati različite postavke ponašanja umreženih autonomnih vozila te različite razine njihovog udjela u prometnom toku. Za pojednostavljenje provođenja takve analize se izrađuje pripadna programska podrška koja omogućuje automatizirano izvođenje serije simulacija uz pripadno kreiranje skupa prikupljenih simulacijskih rezultata pogodnog za analizu primjenom uredskih programskih alata. U radu je potrebno za dostupne prometne podatke autoceste Zagreb-Karlovac izraditi mikroskopski simulacijski model, implementirati programsku podršku za provođenje serije simulacija uz različite postavke udjela umreženih autonomnih vozila i njihovog ponašanja te analizirati dobivene rezultate.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

prof. dr. sc. Edouard Ivanjko

Filip Vrbanić, mag. ing. traff. (komentor)

PROGRAMSKA PODRŠKA ZA SIMULACIJU PROMETNIH TOKOVA NA AUTOCESTAMA

SAŽETAK

Ovaj završni rad istražuje utjecaj autonomnih i povezanih umreženih vozila na prometne tokove na autocestama, s posebnim fokusom na dionicu Zagreb-Karlovac. U radu se analiziraju različiti aspekti prometnog sustava, uključujući vrijeme putovanja, gustoću prometa, brzinu vožnje, protok vozila, emisije štetnih plinova, potrošnju goriva i električne energije, te sigurnost u prometu kroz vrijeme slijeđenja. Simulacije su pokazale da povećanje udjela autonomnih vozila može poboljšati protočnost prometa, smanjiti emisije i potrošnju energije, te povećati sigurnost u prometu. Međutim, potrebno je naglasiti da su rezultati dobiveni na autocesti, gdje su prometni tokovi jednostavniji nego u gradskim sredinama, te da je potrebna daljnja analiza kako bi se razumjeli učinci mješovitih tokova cestovnih vozila u složenijim gradskim okruženjima. Ovaj rad pruža osnovu za buduće istraživanje i razvoj prometnih sustava s autonomnim vozilima, sa ciljem postizanja sigurnijeg, učinkovitijeg i ekološki prihvatljivijeg cestovnog prometa.

KLJUČNE RIJEČI: autonomna vozila; povezana autonomna vozila; prometni tokovi; simulacija prometa; emisije štetnih plinova; sigurnost u prometu

SOFTWARE FOR SIMULATING TRAFFIC FLOWS ON MOTORWAYS

SUMMARY

This thesis explores the impact of autonomous and connected autonomous vehicles on traffic flows on motorways, focusing on the Zagreb-Karlovac section. The study analyzes various aspects of the traffic system, including travel time, traffic density, driving speed, vehicle throughput, emissions of harmful gases, fuel and electricity consumption, and traffic safety through following distance. Simulations indicated that increasing in the share of autonomous vehicles can improve traffic flow, reduce emissions and energy consumption, and enhance road safety. However, it must be emphasized that the results were obtained on a motorway, where traffic flows are simpler than urban environments, highlighting the need for further analysis to understand the effects of mixed traffic flows of road vehicles in more complex urban settings. This work provides a foundation for future research and development of traffic systems with autonomous vehicles, aiming to achieve safer, more efficient, and environmentally sustainable road traffic.

KEYWORDS: autonomous vehicles; connected autonomous vehicles; traffic flows; traffic simulation; emissions reduction; road safety

Sadržaj

1. UVOD	1
2. KARAKTERISTIKE MJEŠOVITIH PROMETNIH TOKOVA CESTOVNIH VOZILA NA AUTOCESTAMA.....	2
2.1. Razina usluge prometnice	3
2.2. Osnovni elementi opisivanja prometnog toka	5
2.3. Elementi u poprečnom presjeku autoceste	6
2.4. Karakteristike autonomnih vozila	7
2.5. Karakteristike umreženih autonomnih vozila	8
3. MIKROSKOPSKI SIMULATORI PROMETA	9
3.1. PTV VISSIM	9
3.2. SUMO	10
3.3. AIMSUN Next.....	11
3.4. Simulatori komunikacijske mreže	12
4. DOSTUPNI PROMETNI PODATCI	13
5. IZRADA PROGRAMSKOG OKRUŽENJA ZA SIMULACIJU	16
6. DOBIVENI REZULTATI.....	18
6.1. Vrijeme putovanja	18
6.2. Gustoća prometa	19
6.3. Brzina vožnje	20
6.4. Protok vozila	21
6.5. Emisije ugljičnog dioksida, dušikovog oksida i ugljičnog monoksida.....	22
6.6. Potrošnja goriva	24
6.7. Potrošnja električne energije kod električnih vozila	24
6.8. Ukupna energija.....	25
6.9. Vrijeme slijeđenja	26
7. ZAKLJUČAK	29
LITERATURA	30
POPIS SLIKA.....	31
POPIS TABLICA.....	32
POPIS GRAFIKONA.....	33

1. UVOD

Razvoj prometne infrastrukture i porast broja vozila na cestama predstavlja izazov za učinkovito upravljanje prometnim tokovima, osobito na autocestama. Autoceste su ključni elementi cestovne prometne mreže. Osmišljene su i izgrađene kako bi omogućile brži i sigurniji protok vozila, no s rastom prometa dolazi do novih izazova poput zagušenja, nesreća i optimizacije korištenja resursa. U ovakvom kontekstu, simulacija prometnih tokova postaje iznimno važan alat za analizu i poboljšanje performansi prometnih sustava.

Uvođenje umreženih autonomnih vozila (engl. Connected Autonomous Vehicles, CAV) u mješovite prometne tokove donosi niz očekivanja usmjerenih na poboljšanje sigurnosti, protok prometa, manje zastoja i vrijeme putovanja, smanjenje emisije štetnih plinova i bolja energetska efikasnost. Radi pripreme za uvođenje takvih vozila u današnje prometne tokove cestovnih vozila bitne su simulacijske provjere radi otkrivanja potencijalnih problema odnosno novih zahtjeva na cestovnu infrastrukturu.

Programska podrška za simulaciju prometnih tokova omogućava istraživačima i inženjerima da modeliraju i analiziraju različite scenarije prometa na autocestama, predviđajući kako će se vozila ponašati u stvarnim uvjetima. Ove simulacije mogu pružiti uvid u utjecaj različitih čimbenika, kao što su promjene u strukturi cesta, uvođenje novih prometnih pravila, ili promjene u obrascima vožnje. Kroz simulaciju je moguće testirati razne intervencije u prometnom sustavu bez stvarnog utjecaja na promet, čime se minimizira rizik i optimiziraju odluke u prometnom planiranju.

Ovaj završni rad je organiziran kako slijedi. Nakon uvodnog poglavlja u drugom poglavlju su opisani osnovni elementi prometnog toka, karakteristike autonomnih (engl. Autonomous Vehicles, AV) vozila i elementi autoceste.

U trećem poglavlju su navedeni i opisani razni mikroskopski simulatori, u četvrtom poglavlju su navedeni podatci koji se obrađuju.

U petom poglavlju prikazana je shema izrade simulacije, u šestom poglavlju su prikazani i analizirani dobiveni rezultati simulacije. Završni rad završava sedmim poglavljem u kojem je dan zaključak i smjernice za potencijalan budući rad.

2. KARAKTERISTIKE MJEŠOVITIH PROMETNIH TOKOVA CESTOVNIH VOZILA NA AUTOCESTAMA

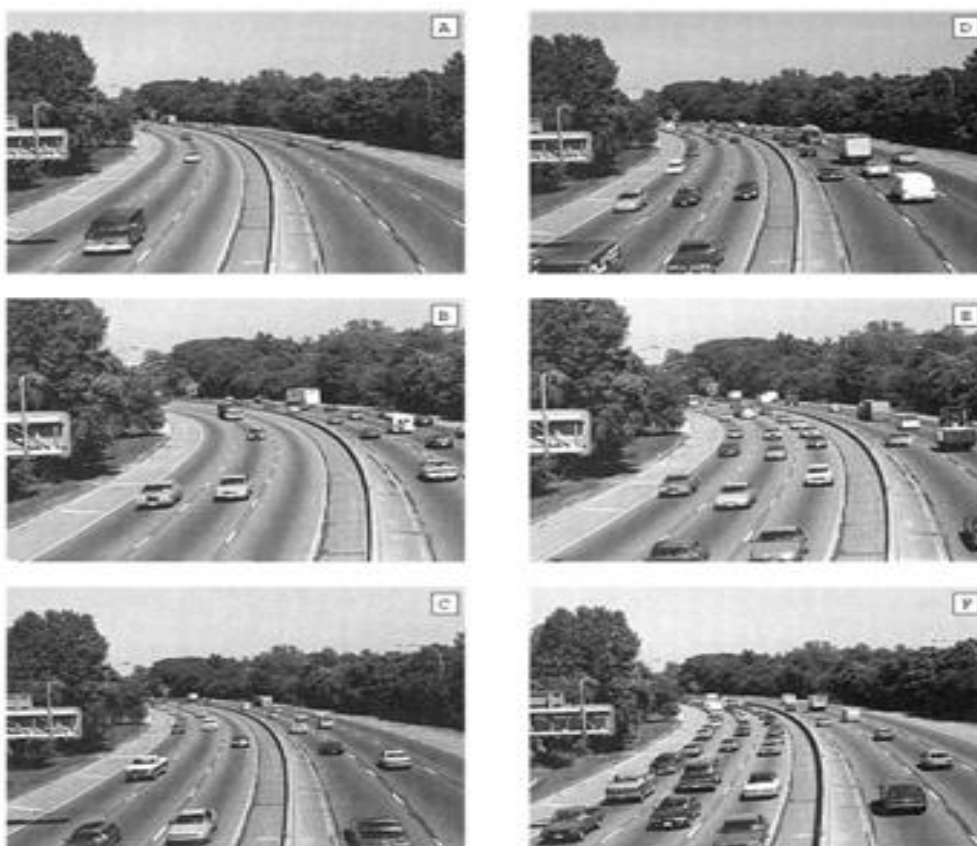
Ono o čemu društvo teži je sigurna, jeftina, učinkovita i ekološki prihvatljiva mobilnost. S brzim razvojem autonomnih vozila (engl. Autonomous Vehicle, AV) i CAV-ova pojavljuju se nove mogućnosti i prilike. Čak iako nije točno poznato kada će biti implementacija AV-ova, predviđa se da će udio AV-ova na potrošačkim tržištima u razvijenijim zemljama narasti na preko 70% do 2050. godine. Sa značajnim povećanjem znanja i stalnim poboljšanjima računalne snage, značajke autonomne vožnje određene razine se uvode u gotovo svako novo vozilo. Prilagodljivi tempomat (engl. Adaptive cruise control, ACC), upravljanje slijeđenja vozne trake i automatsko kočenje u nuždi već su uvedene od strane svih velikih marki, što ukazuje na istraživačke napore koji se ulažu u autonomna vozila. Posljednjih godina značajno se razvila i umrežavanja vozila. Tehnologija povezivanja omogućila je poboljšanu sigurnost, performanse i suradnju među vozilima. Koncept vožnje u koloni (engl. Platooning) označava skupinu vozila koja putuju na maloj udaljenosti kako bi se povećala propusnost na autocestama uz korištenje komunikacije između vozila za koordinaciju manevara više vozila i razmjenu stanja vozila koja omogućuju kratko vrijeme napredovanja između vozila u nizu. CAV-ovi omogućuju različite primjene u inteligentnim transportnim sustavima (ITS), uključujući upravljanje prometom, kooperativnu vožnju, poboljšanu sigurnost i učinkovitiju potrošnju energije. Iako je potrebno uzeti u obzir potrošnju energije osjetila, računalne i komunikacijske opreme CAV-ova [1].

Uvođenje CAV-ova i AV-ova još je u ranoj fazi. Ispitivanje prototipova u stvarnom prometnom okruženju s pravnog aspekta još nije do kraja definirano. Tamo još uvijek postoji praznina i nedovoljno podataka o prometu o utjecaju i interakciji AV-a i CAV-a na prometni tok koji uključuje ljudske vozače. Budući da je stopa penetracije takvih vozila u stvarnom prometu niska, da bi se dobio uvid u njihovu interakciju s ljudskim vozačima, koriste se različiti mikroskopski simulatori za oponašanje AV-ova i CAV-ova unutar mješovitih prometnih tokova cestovnih vozila. Mikroskopski simulatori prometa uglavnom se koriste za simulaciju svakog pojedinog vozila. Izraz mješoviti prometni tokovi cestovnih vozila odnosi se na prometne tokove koji sadrže klasična vozila kojima upravljaju ljudi, AV-ove i CAV-ove. AV-ovi predstavljaju vozila koja mogu dobiti prometne informacije od različitih tehnologija mjerenja kao što su kamere, laserska osjetila, radari integrirani unutar vozila. Odlikuje ih visoko poštivanje prometnih zakona, kraći vremenski i prostorni razmak između vozila te manji zaustavni put. CAV-ovi su slični AV-ovima s dodanim značajkama koje omogućuju komunikaciju s drugim vozilima, infrastrukturom uz cestu kao što su sustavi upravljanja prometnom signalizacijom, infrastrukturom i cjelokupnom okolinom okruženja [1].

2.1. Razina usluge prometnice

Razina usluge prometnice (engl. Level of Service, LoS) je kvalitativna mjera koja se sastoji od niza elemenata, kao što su: brzina vožnje vrijeme putovanja, prekidi u prometu, sloboda manevriranja, sigurnost vožnje, udobnost vožnje. Prema objavljenom opisu odvijanja i pravila za prometne tokove autocesta (engl. Highway Capacity Manual, HCM), pri odvijanju putovanja vozila unutar prometnog toka se može pojaviti šest razina LoS-a kao što je prikazano na slici 1 [2]:

1. **Razina usluge A:** uvjeti slobodnog prometnog toka s velikim brzinama, malom gustoćom i punom slobodom manevriranja;
2. **Razina usluge B:** uvjeti slobodnog prometnog toka, s brzinama koje su samo djelomično ograničene gustoćom prometa;
3. **Razina usluge C:** stanje stabilnog prometnog toka, s ograničenim brzinama i ograničenom mogućnošću manevriranja;
4. **Razina usluge D:** stanje prometnog toka koji se približava nestabilnom toku, velike gustoće s bitno ograničenim brzinama i malom mogućnošću manevriranja;
5. **Razina usluge E:** stanje nestabilnog toka s vožnjom u nizu, gdje je gustoća bliska zagušenju, a protok jednak propusnoj moći, pa su mogući povremeni zastoji;
6. **Razina usluge F:** prometni tok s brzinama koje su manje od kritičnih brzina, gustoća je veća od kritične, a protok je u rasponu od nule do vrijednosti koja je manja od propusne moći.



Slika 1 Prikaz gustoće prometnog toka za različit iznos LoS-a [3]

Tablica 1 prikazuje gustoću prometa koja odgovara različitim razinama usluge.

Prema [3] gustoća se računa pomoću formule (1):

$$D = \frac{v_p}{S}, \quad (1)$$

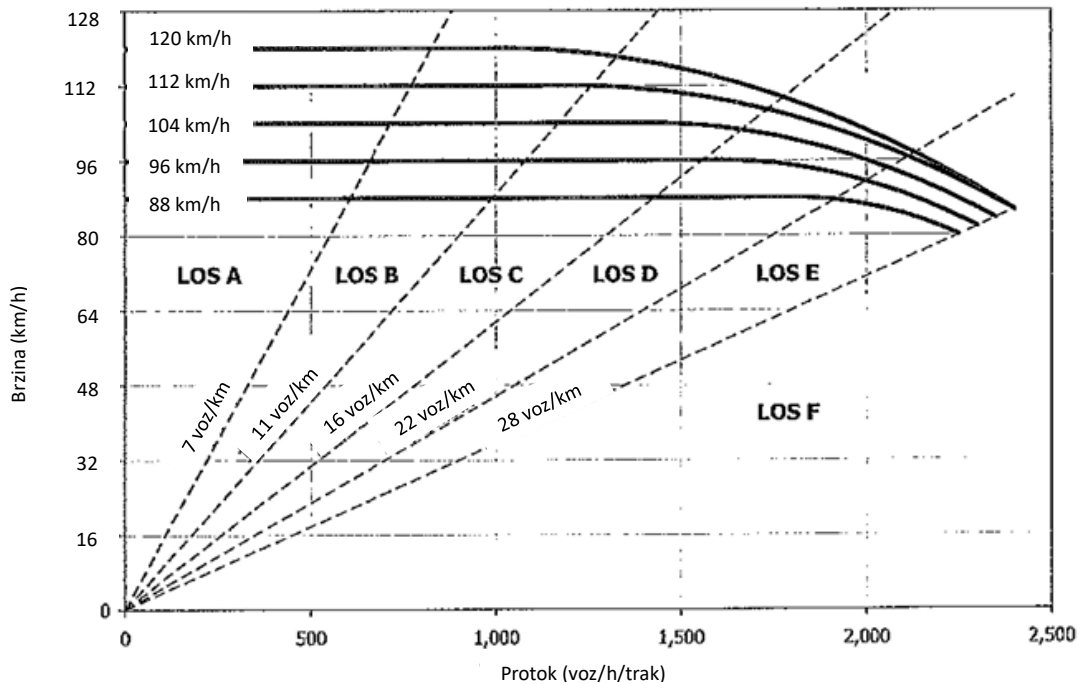
gdje oznake imaju slijedeće značenje:

- D = gustoća prometa (voz/km);
- v_p = protok (voz/h/trak);
- S = srednja brzina prometa (mi/h, km/h).

Tablica 1 LoS za autoceste definiran pomoću gustoće prometnog toka [4]

LoS	D po voznoj traci (voz/km)
A	≤ 7
B	$7 \leq 11$
C	$11 \leq 16$
D	$16 \leq 22$
E	$22 \leq 28$
F	> 28

Slika 2 prikazuje grafikon koji se odnosi na analizu razine usluge u prometu, s posebnim naglaskom na odnos između brzine, gustoće i protoka. Prikazane su krivulje koje predstavljaju različite brzine (88 km/h, 96 km/h, 104 km/h, 112 km/h, 120 km/h preračunato iz originalne jedinice mi/h, milje po satu) u odnosu na protok. Krivulje su iskrivljene prema dolje kako se protok povećava, što znači da s povećanjem protoka brzina se smanjuje. Ovo ukazuje na zagušenje prometa pri većim protokom. Slika 2 također prikazuje različite zone koje označavaju različite razine usluge od A do F i isprekidane linije predstavljaju gustoću prometa. Razina usluge A (najviša razina usluge) odgovara niskim vrijednostima protoka i visokim brzinama, a razina usluge F (najniža razina usluge) označava situaciju kada gustoća prelazi kapacitet ceste, uz niže brzine i veći protok.



Slika 2 Prikaz grafikona s krivuljama koje predstavljaju brzine i razine usluga [3]

2.2. Osnovni elementi opisivanja prometnog toka

U osnovne elemente opisivanja prometnog toka pripadaju: protok, gustoća i brzina prometnog toka, vrijeme putovanja, vremenski interval, razmak između vozila u nizu i propusna moć [5].

Protok vozila q (voz/h): označuje broj vozila koja prođu kroz poprečni presjek ceste ili jednog prometnog traka u jedinici vremena. Prometni tok može biti homogen ili stvarni tok. Homogenim tokom smatra se tok jedne vrste motornih vozila sastavljen od vozila istih tehničkih značajki. Tako može biti tok: teretnih, osobnih, specijalnih i drugih vozila. Idealni homogeni prometni tok bio bi kada bi takvim vozilima upravljali vozači istih psiho-fizičkih značajki i kada bi na svim dijelovima ceste bili osigurani jednaki uvjeti vožnje. Međutim, u praksi takav homogeni tok ne postoji. Stvarnim tokom smatra se prometni tok koji se sastoji od više vrsta vozila [6].

Gustoća prometnog toka g (voz/km): predstavlja broj vozila koja se u određenom trenutku nalaze na jedinici duljine prometnice. Izražava se kod cesta s više prometnih traka i po voznoj traci [6].

Brzina prometnog toka V (km/h): određuje se pomoću srednje vremenske brzine i srednje prostorne brzine. Srednja vremenska brzina prometnog toka aritmetička je sredina brzina svih vozila koja prolaze određeni presjek ceste u vremenu. Srednja prostorna brzina prometnog toka aritmetička je sredina trenutačnih brzina vozila u određenom dijelu ceste [5].

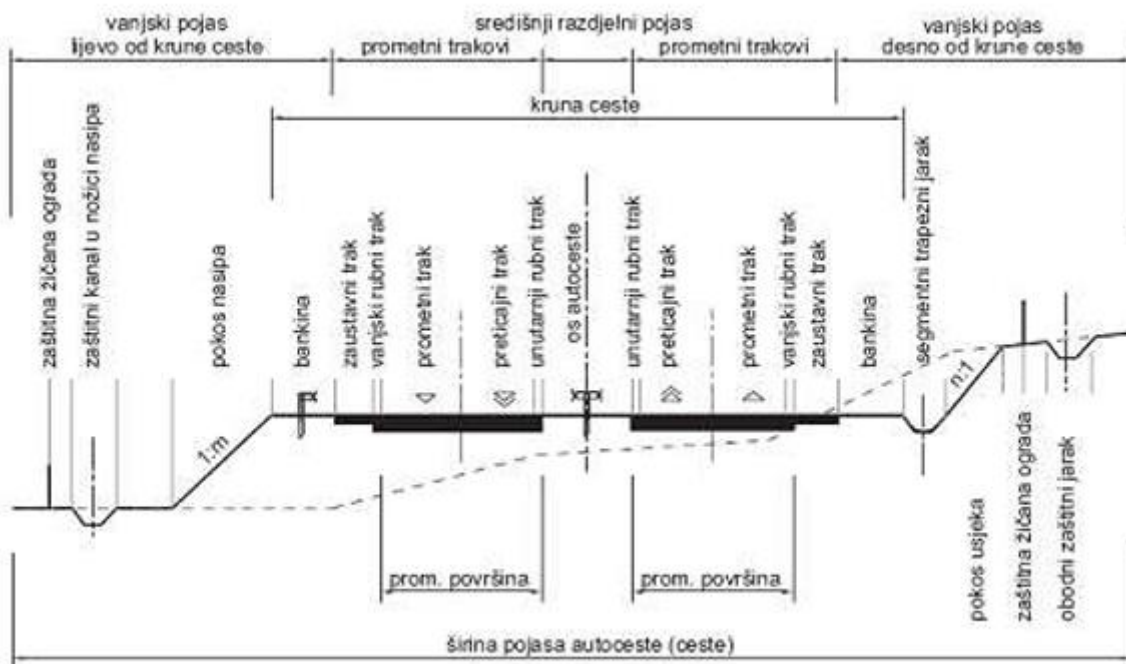
Vrijeme putovanja t (s): je vrijeme potrebno da jedno vozilo prijeđe određenu udaljenost na cesti [6].

Vremenski interval razmaka između vozila t_t (s): je vrijeme između prolaska dvaju uzastopnih vozila kroz poprečni presjek ceste [5].

Prosječni razmak između vozila u nizu r_s (m): je prosječna vrijednost razmaka svih vozila u nizu. Mjeri se kao prostorna i vremenska udaljenost slijeđenja vozila [5].

Propusna moć N (voz/h): maksimalni je broj vozila koji može proći u jedinici vremena kroz promatrani presjek cestovne prometnice. Na osnovi poznavanja propusne moći mogu se procijeniti nedostaci postojeće cestovne mreže predložiti odgovarajuće izmjene [6].

2.3. Elementi u poprečnom presjeku autoceste



Slika 3 Poprečni presjek autoceste [3]

Poprečni presjek autoceste ima ove osnovne elemente koji su prikazani i na slici 4:

- Dva vanjska zelena pojasa (bankine) širine 1,5 m;
- Dva vanjska rubna traka širine 0,5 m;
- Dva vanjska zaustavna traka širine 2,5 m;
- Dva kolnika (svaki za jedan smjer vožnje) širine 2 x 3,75 m;
- Dva unutarnja rubna traka širine 0,5 m;
- Središnji razdjelni pojas širine 4,0 m.

2.4. Karakteristike autonomnih vozila

O utjecaju i razvoju AV-ova (također poznatih kao samovozeći automobili, automobili bez vozača ili robotski automobili) naširoko se raspravlja zbog značajnih poboljšanja u naprednim sustavima pomoći vozaču i komunikacija vozila. AV je vozilo koje radi bez ljudskog upravljanja i zahtijeva samo nekoliko ili minimalno ljudskih intervencija, ovisno o njegovoj razini automatizacije. Komunikacija unutar vozila, također poznata kao komunikacija vozilo-osjetilo (engl. Vehicle-to-Sensors, V2S), omogućuje AV-ima da izmjere stanje okoline koja ih okružuje, detektiraju i klasificiraju različite okolne objekte, obrađuju sve informacije s osjetila i identificiraju odgovarajuće parametre vožnje poštujući prometne zakone i propise. Pojam autonomna vožnja odnosi se na upravljanje uzdužnog i bočnog gibanja vozila. Sustavi autonomne vožnje uključuju niz osjetila za percepciju okoline koji uključuju radare, kamere i ultrazvučna osjetila koji omogućuju autonomnu vožnju u stohastičkim prometnim okruženjima. U gradskim sredinama, gdje je GPS točnost niska, sustav percepcije visoke rezolucije primjenom fuzije osjetila (kamera (3D) radar ili lasersko osjetilo) u kombinaciji s kartama okoline visoke rezolucije, može osigurati precizno pozicioniranje za sustav autonomne vožnje. Godine 2018. Međunarodna organizacija inženjerske automobilske industrije (engl. Society of Automotive Engineers, SAE) International objavila je revidirani dokument za razine automatizacije vožnje koji definira šest različitih razina [1].

Tablica 2 Prikaz razina automatizacije [1]

Razina	Opis	Potrebno ljudsko upravljanje	Značajke
Razina 0	Bez automatizacije vožnje u segmentu podrške za vozača	Čovjek upravlja vozilom čak i ako su značajke podrške aktivne	Ograničeno na pružanje upozorenja i pomoći
Razina 1	Bez automatizacije vožnje u segmentu podrške za vozača	Čovjek upravlja vozilom čak i ako su značajke podrške aktivne	Podrška upravljanju ili kočenju/ubranju
Razina 2	Bez automatizacije vožnje u segmentu podrške za vozača	Čovjek upravlja vozilom čak i ako su značajke podrške aktivne	Podrška upravljanju ili kočenju/ubranju
Razina 3	Značajke automatizirane vožnje koje upravljaju vozilom pod ograničenim uvjetima	Kada sustav zahtijeva, čovjek mora upravljati vozilom	„Vozač u prometnoj gužvi“
Razina 4	Značajke automatizirane vožnje koje upravljaju vozilom pod manje ograničenim uvjetima	Ne zahtijeva čovjeka da preuzme vožnju	„Taksi bez vozača“, upravljač ne mora biti postavljen
Razina 5	Značajke automatizirane vožnje koje upravljaju vozilom u svim uvjetima	Ne zahtijeva čovjeka da preuzme vožnju	Potpuno autonomna vožnja u svim uvjetima

Tablica 2 prikazuje opis razine automatizacije i podršku upravljačkog programa, uključujući značajke razine automatizacije. Razina 0 zahtijeva potpunu ljudsko upravljanje. Značajke koje pomažu vozaču uključuju sustave kao što su automatsko kočenje u nuždi, upozorenje na mrtvi

kut i upozorenje na napuštanje prometne trake ne postoje u ovoj razini. Razina 1 sadrži navedene značajke, ali i dalje zahtijeva potpunu ljudsku kontrolu za upravljanje vozilom.

Ovdje navedene značajke uključuju i centriranje vozila unutar prometne trake. Razina 2 slična je razini 1, ali se navedene značajke mogu koristiti istovremeno. U razini 3, većinom zadataka vožnje upravljaju napredni sustavi za automatiziranu vožnju, ali može se zahtijevati da vozilom upravlja čovjek u neizvjesnim situacijama. Razina 4 predstavlja potpuno autonomni način vožnje, a takvo vozilo ne mora imati čak ni upravljač. Ako se pojavi neka nesigurnost u automatiziranim sustavima vozila, vozilo može prekinuti rad i sigurno prestati voziti, odnosno stati. Razina 5 odnosi se na potpuno autonomno vozilo, koje može samostalno voziti u svim meteorološkim i prometnim uvjetima bez ljudske intervencije [1].

2.5. Karakteristike umreženih autonomnih vozila

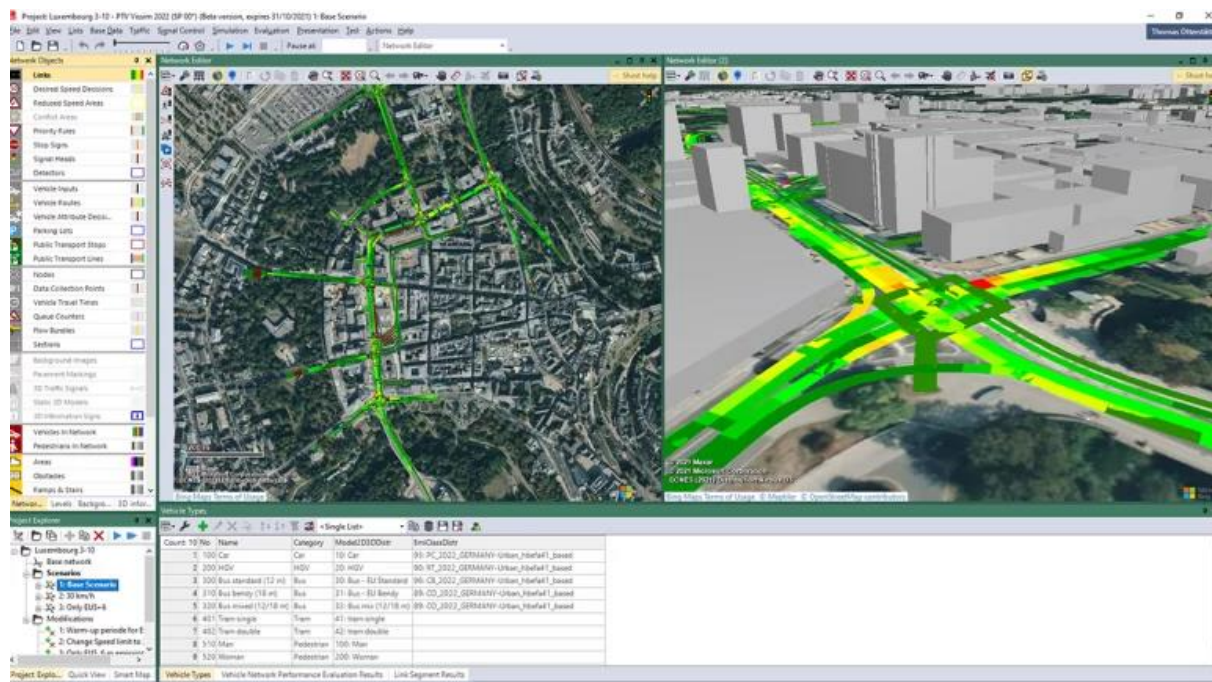
CAV je tehnologija koja omogućuje značajku povezivanja koja potencijalno smanjuje broj prometnih nezgoda i poboljšava učinkovitost prometa u gradskim sredinama. CAV se definira kao vozilo koje može raditi automatiziranom vožnjom i dijeljenjem informacija putem povezivanja s drugim vozilima, sudionicima u prometu, cestovnom infrastrukturom. CAV-ovi su pokazali pozitivne učinke na gradski promet u usporedbi s današnjim iskustvima. Veća propusna moć s manjim prostornim i vremenskim razmakom između vozila što rezultira povećanim operativnim kapacitetom prometnice, a ne većim vremenom kašnjenja. Također se napominje da bi se broj vozila u vlasništvu mogao smanjiti dijeljenjem vozila unutar firme ili pojedinaca trećih strana. Stoga bi broj vozila po kućanstvu mogao pasti s dostupnošću CAV-ova. Takvo se vozilo nakon obavljene usluge mobilnosti može vratiti kući kako bi ga koristili drugi članovi kućanstva. Ljudi koji nemaju vozačku dozvolu imali bi značajnu korist od CAV-a jer bi umjesto javnog prijevoza mogli koristiti CAV-ove. Kao što je spomenuto, prometne nezgode također će se potencijalno smanjiti uklanjanjem ljudske pogreške pomoću AV i CAV. Procjenjuje se da će se pojava prometnih nesreća smanjiti za 50% do 2040. godine korištenjem ovih tehnologija. Povezanost i komunikacija vozila ključni su zahtjevi za rad CAV-a u domeni ITS-a. Komunikacija je ključna komponenta za postizanje suradnje više vozila i svjesnosti o preprekama izvan linije vidljivosti jednog vozila. Tehnologije koje se koriste za postizanje takve komunikacije su komunikacije kratkog dometa (engl. Dedicated Short Range Communications, DSRC) i mobilne komunikacije (4G i 5G). Primjena DSRC-a uključuje sigurnosna upozorenja, pomoć pri prolasku kroz raskrižje, obavijesti o stanju u prometu te plaćanje cestarina i parkiranja. Sa druge strane, 5G nudi pristup uslugama u oblaku s nižom latencijom i suradnju s drugim vozilima i infrastrukturom [1].

3. MIKROSKOPSKI SIMULATORI PROMETA

Mikroskopska simulacija prometa važan je alat za svaku opću prometnu analizu. Koristi se za analizu prometa kroz detaljan prikaz ponašanja pojedinih vozila. Važno je formulirati prometne mikroskopske simulacijske modele koji obuhvaćaju mogućnosti novih tehnologija kao i ponašanje vozila kako bi se istražili utjecaji AV i CAV na mješovite prometne tokove cestovnih vozila. Najčešće korišteni komercijalni mikroskopski simulatori prometa koji podržavaju CAV i AV su VISSIM i AIMSUN, a najčešće korišteni simulator otvorenog kôda je SUMO. Za modeliranje povezanosti i komunikacije između vozila obično se koriste mrežni simulatori kao što su NS-3 i OMNET++ [1].

3.1. PTV VISSIM

PTV VISSIM je komercijalni mikroskopski simulator prometa koji omogućuje simulaciju kretanja pojedinačnog vozila. Podržava ugrađenu simulaciju pješaka i vozila u jednoj programskoj platformi. Omogućuje oponašanje realnih lokalnih uvjeta s detaljnim prikazom ceste i modela ponašanja vozila. Daje realan i detaljan pregled utjecaja prometnog toka, s mogućnostima prikaza više mogućih scenarija. Funkcije VISSIM-a omogućuju praćenje automobila, promjene prometne trake i brzina vozila. Neke od metoda za modeliranje značajki povezanih s AV-ima unutar dane prometne mreže uključuje manje udaljenosti mirovanja, manje bočne udaljenosti, ubrzanja iz mirovanja, stvaranje prostora za vozila hitne pomoći i još mnogo toga [1]. Slika 5 prikazuje izgled sučelja mikroskopskog simulatora PTV VISSIM.



Slika 4 Prikaz PTV VISSIM simulacijskog sučelja [7]

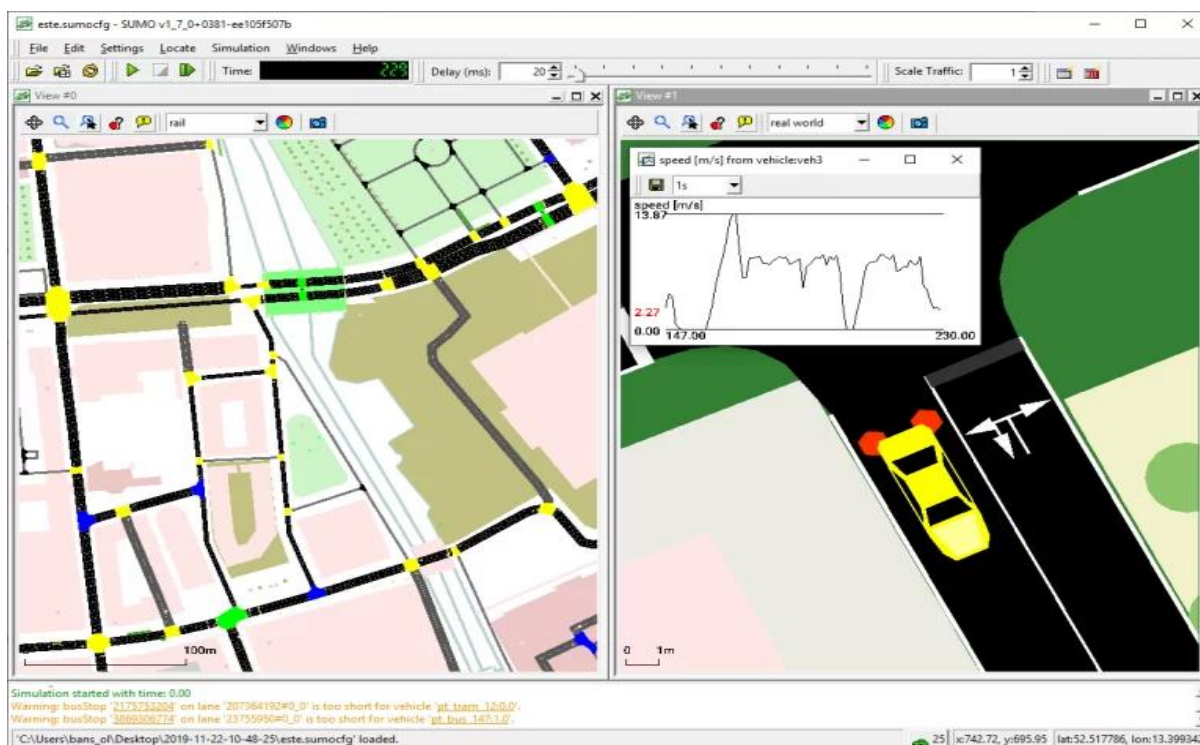
U VISSIM-u su dostupna tri različita sučelja:

1. Sučelje DriverModel.DLL;
2. Sučelje DrivingSimulator.DLL;
3. COM sučelje razmjene podataka između različitih aplikacija.

Prvo, sučelje DriverModel.DLL prikladno je za simulaciju AV-ova u interakciji s drugim vozilima. Drugo, sučelje DrivingSimulator.DLL omogućuje testiranje interakcija između AV-ova, vozila i pješaka. Treće, COM sučelje prikladno je za razvoj algoritama za kontrolu AV ponašanja i drugih procesa poput semafora pri čemu se upravljački algoritam izvodi u sklopu druge nezavisne aplikacije koja razmjenjuje podatke s VISSIM programskim alatom [1].

3.2. SUMO

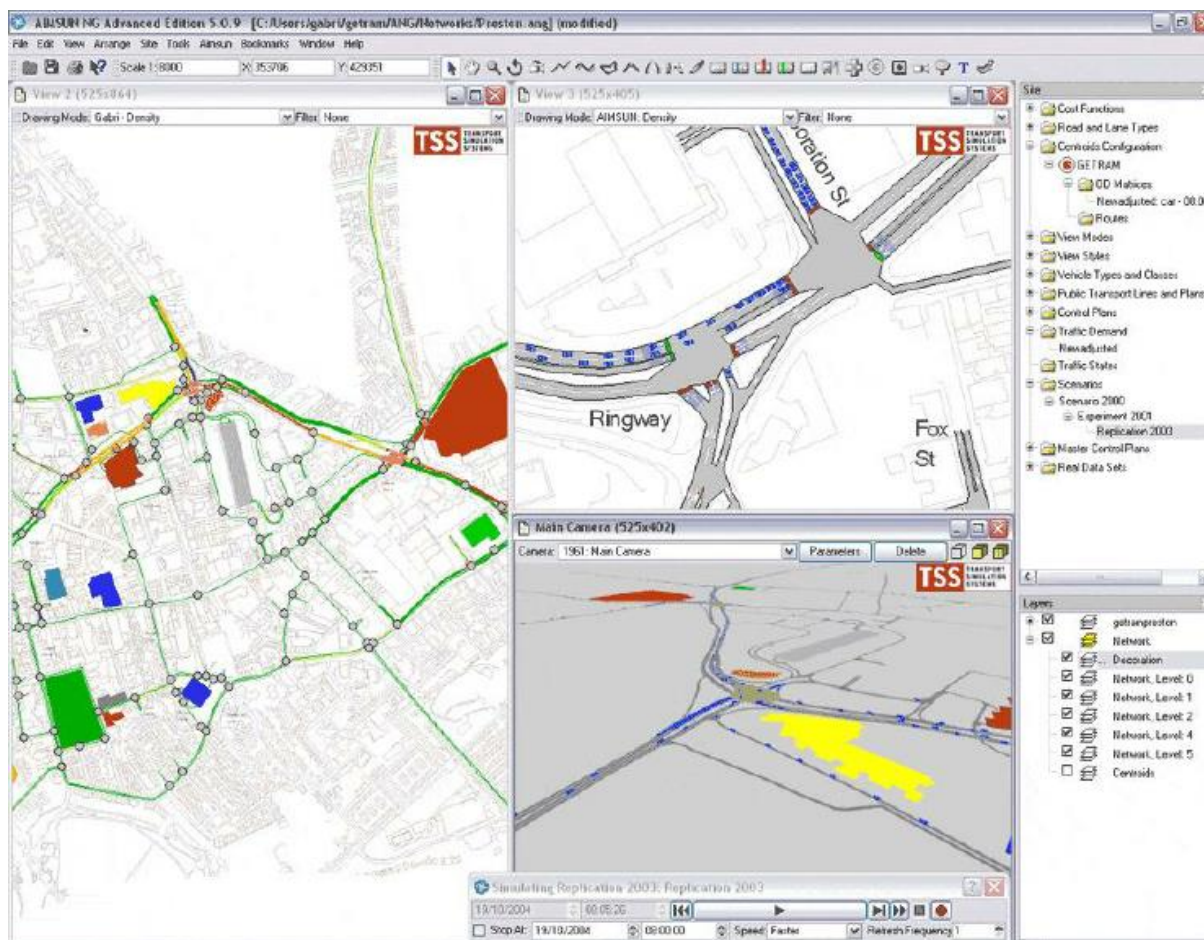
SUMO je mikroskopski simulator prometa otvorenog kôda. Svako vozilo definirano je identifikatorom (ID), vremenom polaska i rutom vozila kroz mrežu, ali se također može opisati s više detalja. Mogu se modelirati svojstva odlaska i dolaska, dodijeljena vrsta (klasa) vozila, koja predstavlja fizička svojstva vozila. Za scenarije velikih razmjera, matrice polazišta/odredišta koriste se za definiranje putovanja između prometnih zona. Rute se određuju koristeći postupak usmjeravanja kao što je izračun najkraćeg puta pod različitim funkcijama troškova. SUMO osigurava sučelje za kontrolu prometa koje pruža statističke podatke i izravan pristup elementima. SUMO ne pruža izravno AV simulaciju. To se može učiniti integracijom s prometnim i robotskim simulatorom [1]. Slika 6 prikazuje izgled sučelja mikroskopskog simulatora SUMO.



Slika 5 Prikaz SUMO simulacijskog sučelja [7]

3.3. AIMSUN Next

AIMSUN Next simulator omogućuje modeliranje malih i velikih prometnih mreža. Izradom Python skripte omogućuje omogućuju se automatizirane operacije kao što su modificiranje parametara modela, uvoz i izvoz podataka, izvođenje dodatnih izračuna na izlaznim podacima simulacije i pokretanje više simulacija. AIMSUN Next ima značajke za modeliranje CAV-ova koje uključuju prilagođavanje modela ponašanja automobila u nizu, promjene trake i prihvaćanja razmaka [1]. Slika 7 prikazuje izgled sučelja mikroskopskog simulatora AIMSUN Next.



Slika 6 Prikaz AIMSUN Next simulacijskog sučelja [7]

3.4. Simulatori komunikacijske mreže

Najčešće korišteni simulatori komunikacijskih mreža su NS-3 i OMNeT++. NS-3 je mrežni simulator otvorenog kôda s diskretnim događajima za internetske sustave koji se koriste za istraživanje i obrazovanje. Podržava velike scenarije simulacije do 20.000 komunikacijskih čvorova za stvarniju simulaciju. Za komunikaciju sa simulatorima NS-3 i SUMO-om pomoću TraCI sučelja korišten je prilagođeni komunikacijski model klijent/poslužitelj. NS-3 koristi programsku petlju (npr. „while“) za kontrolu SUMO-ovog vremenskog okvira prometne simulacije. NS-3 zahtijeva položaj vozila u simuliranom SUMO scenariju svake milisekunde i ažurira ga u NS-3. Nakon pokretanja simulacije, NS-3 dinamički mijenja rutu vožnje vozila unutar SUMO-a putem stvarnovremene razmjene podataka između te dvije aplikacije. OMNeT++ je proširiva, modularna simulacijska biblioteka i okvir za izgradnju mrežnih simulatora. Uključuje žičane i bežične komunikacijske mreže, mreže na čipu, mreže za red čekanja i više. Razvijeno je sučelje otvorenog kôda Veins za pokretanje simulacija mreže vozila. Temelji se na dva simulatora: OMNeT++ i SUMO koji nudi sveobuhvatan paket modela za simulaciju komunikacije između vozila [1].

4. DOSTUPNI PROMETNI PODATCI

Brojenjem prometa u Republici Hrvatskoj obuhvaćena je mreža državnih te značajan dio županijskih i lokalnih cesta, a dodatno se prikupljaju, obrađuju i prikazuju prometni podatci s autocesta, drugih cesta i objekata s naplatom uporabe te državnih trajektnih linija odnosno s preko 950 mjernih mjesta brojanja prometa. Dostupni prometni podatci prikupljeni su s državne autoceste A1 kod Karlovca. Prometni podatci su prikupljeni na način neprekidnog automatskog brojanja [8]. Sustavno brojanje prometa se odvija na:

- Državnim cestama;
- Cestovnim građevinama s naplatnim postajama;
- Županijskim cestama;
- Lokalnim cestama;
- Trajektnim pristaništima.

Za dosadašnje prikupljanje podataka o količini i strukturi prometa, korištena su tri osnovna načina brojanja [9]:

- Neprekidno automatsko brojenje brojilima na državnim, županijskim i lokalnim cestama;
- Povremeno automatsko brojenje brojilima na državnim, županijskim i lokalnim cestama;
- Naplatno brojenje na autocestama, drugim cestovnim građevinama s naplatom prolaska vozila i u trajektnim pristaništima.

Republika Hrvatska ima poprilično dobru količinu prometnih podataka u bazi podataka jer se brojanje prometa izvodi sustavno još od ranih sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Time je stvoren bogat fond podataka nužnih za racionalno gospodarenje cestama, što podrazumijeva istraživanje, planiranje, projektiranje, izgradnju, rekonstrukciju i održavanje cesta. S tim prikupljenim prometnim podacima Hrvatske Autoceste d.o.o. izrađuju prosječni godišnji dnevni promet (PGDP), prosječni ljetni dnevni promet (PLDP), utvrđivanje osnovnih promjena prometa (porast ili pad prometa u odnosu na prethodnu godinu) te izračunan prosječnog godišnjeg postotka promjene PLDP-a [9].

Prometni podatci nad kojima je vršena obrada podataka spremjeni su u datoteke s nastavkom „.xlsx“. Za osnovnu prilagodbu/organiziranje dobivenih prometnih podataka korišten je programski alat Excel iz programskog paketa Microsoft Office. Dobivene su dvije tablice, gdje su podatci organizirani po satnim intervalima za tri godine (2018, 2019, 2020) posebno za voznu i pretjecajnu prometnu traku i oba smjera (Zagreb-Karlovac i Karlovac-Zagreb). Interval prikupljenih podataka je svakih sat vremena, dakle 24 stupaca u tablici predstavlja prometni tok jednoga dana po satnim intervalima.

Prva tablica naziva „PoBrzinama“ (slika 7) sadrži podatke o ukupnom prometnom toku (Q_{uk}) osobnih i teretnih vozila s obzirom na voznu i pretjecajnu traku, te broj vozila unutar određene kategorije brzine, također za pretjecajnu i voznu traku za oba smjera prometnog toka. Ukupno ima 35 atributa/stupaca i 23.812 redaka/zapisa za 3 godine.

Dan	Sat	Brak_pretjecajna	Qiv_pretjecajna	Qiv_vozna	Qov_pretjecajna	Qov_vozna	0-40 km/h_pretjecajna	41-50 km/h_pretjecajna	51-60 km/h_pretjecajna	61-70 km/h_pretjecajna	71-80 km/h_pretjecajna	81-90 km/h_pretjecajna	91-100 km/h_pretjecajna	101-131
0	2018-01-01 00:00:00	0	5	0	0	185	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2018-01-01 01:00:00	1	4	6	0	155,87	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2018-01-01 02:00:00	2	15	15	0	155,47	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2018-01-01 03:00:00	3	7	7	0	153,29	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2018-01-01 04:00:00	4	10	10	0	144,9	0	0	0	0	0	0	0	1
5	2018-01-01 05:00:00	5	1	1	0	173	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2018-01-01 06:00:00	6	5	5	0	153	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2018-01-01 07:00:00	7	7	7	0	163,57	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2018-01-01 08:00:00	8	13	12	1	157,33	104	0	0	0	0	0	0	0
9	2018-01-01 09:00:00	9	13	13	0	144,31	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2018-01-01 10:00:00	10	55	55	0	149,2	0	0	0	0	0	0	0	0
11	2018-01-01 11:00:00	11	117	117	0	153,4	0	0	0	0	0	0	0	0
12	2018-01-01 12:00:00	12	182	182	0	152,47	0	0	0	0	0	0	0	0
13	2018-01-01 13:00:00	13	189	189	0	153,88	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2018-01-01 14:00:00	14	200	200	0	153,6	0	0	0	0	0	0	0	0
15	2018-01-01 15:00:00	15	235	234	1	137,19	106	0	0	0	0	0	0	0
16	2018-01-01 16:00:00	16	240	237	3	123,28	97,33	0	0	0	0	0	1	6
17	2018-01-01 17:00:00	17	165	165	0	125,15	0	0	0	0	0	0	0	2
18	2018-01-01 18:00:00	18	154	149	5	128,26	108,8	0	0	0	0	0	0	1
19	2018-01-01 19:00:00	19	83	84	1	136,88	106	0	0	0	0	0	0	0
20	2018-01-01 20:00:00	20	64	64	0	145,56	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2018-01-01 21:00:00	21	43	43	0	139,74	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2018-01-01 22:00:00	22	25	25	0	136,32	0	0	0	0	0	0	0	0
23	2018-01-01 23:00:00	23	18	17	1	138,06	100	0	0	0	0	0	0	1
24	2018-01-02 00:00:00	0	14	14	0	129	0	0	0	0	0	0	0	1
25	2018-01-02 01:00:00	1	10	10	0	139,4	0	0	0	0	0	0	0	0
26	2018-01-02 02:00:00	2	5	4	1	132	104	0	0	0	0	0	0	0
27	2018-01-02 03:00:00	3	7	6	1	158,17	105	0	0	0	0	0	0	0
28	2018-01-02 04:00:00	4	23	22	1	132,27	116	0	0	0	0	0	0	1
29	2018-01-02 05:00:00	5	69	67	2	138,84	94,5	0	0	0	0	0	0	2
30	2018-01-02 06:00:00	6	187	180	7	141,16	105	0	0	0	0	0	1	3
31	2018-01-02 07:00:00	7	380	378	2	140,43	110	0	0	0	0	0	0	0
32	2018-01-02 08:00:00	8	198	197	1	145,05	118	0	0	0	0	0	0	0
33	2018-01-02 09:00:00	9	219	218	1	144,07	101	0	0	0	0	0	1	1
34	2018-01-02 10:00:00	10	304	303	1	144,23	97	0	0	0	0	0	0	2
35	2018-01-02 11:00:00	11	358	354	4	142,33	100,25	0	0	0	0	0	2	2

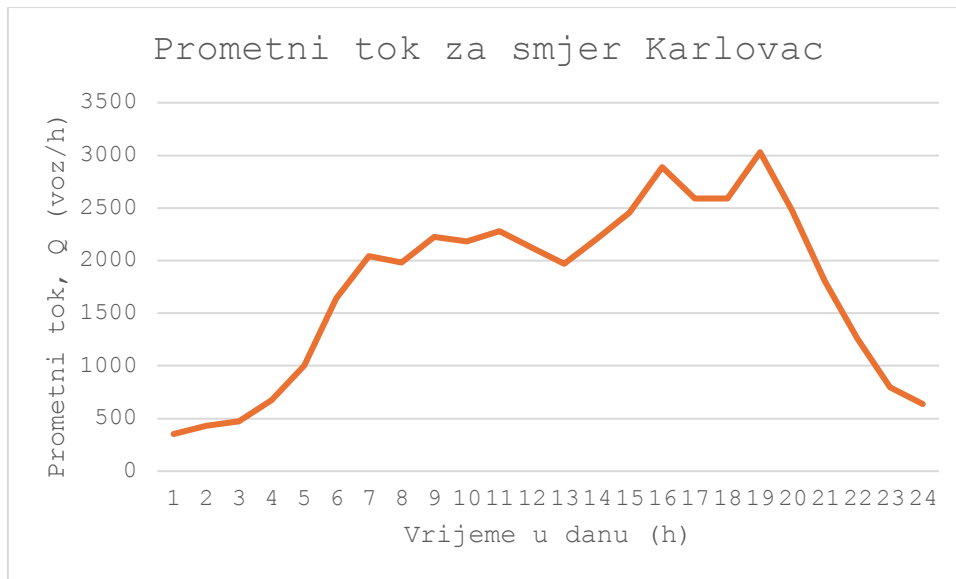
Slika 7 Tablica prometnih podataka "PoBrzinama"

Druga tablica naziva „PoKategorijama“ (slika 8) sadrži podatke o grupiranim vozilima s obzirom na voznu i pretjecajnu traku te smjeru odvijanja prometa.

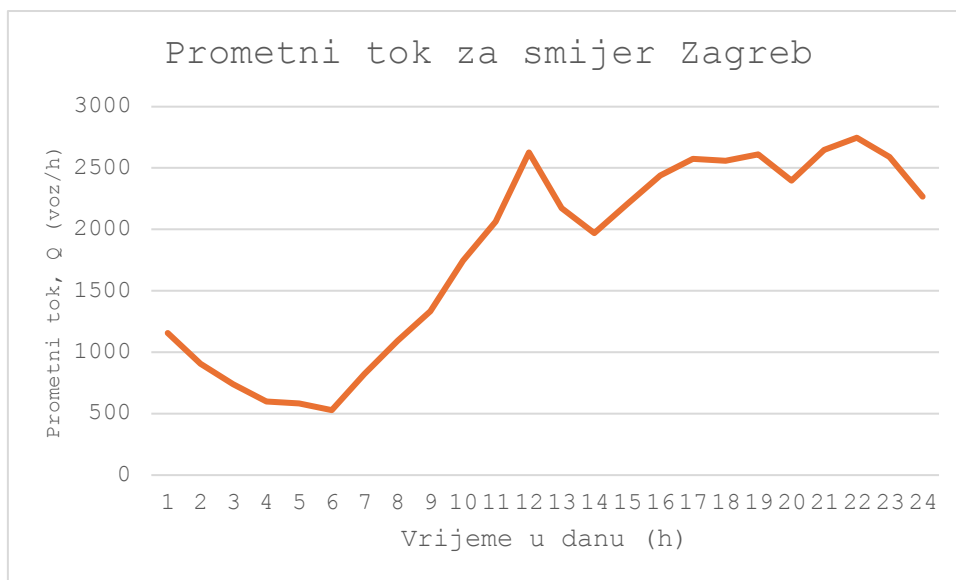
Dan	Sat	Neklasificirano_pretjecajna	Motocikli_pretjecajna	Osobna vozila_pretjecajna	Kombiji_pretjecajna	Osobna vozila s prikolicom_pretjecajna	Kamioni_pretjecajna	Imeniki s prikolicom_pretjecajna	Triljaci_pretjecajna	Autobusi_pretjecajna	Ukupno_pretjecajna
0	2018-01-01 00:00:00	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
1	2018-01-01 01:00:00	1	0	0	2	0	0	0	0	0	2
2	2018-01-01 02:00:00	2	0	0	7	0	0	0	0	0	9
3	2018-01-01 03:00:00	3	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4	2018-01-01 04:00:00	4	0	0	3	1	0	0	0	0	4
5	2018-01-01 05:00:00	5	0	0	3	0	0	0	0	0	3
6	2018-01-01 06:00:00	6	0	0	3	0	0	0	0	0	3
7	2018-01-01 07:00:00	7	5	4	1	3	0	0	0	0	13
8	2018-01-01 08:00:00	8	1	0	3	0	0	0	0	0	4
9	2018-01-01 09:00:00	9	1	0	6	1	0	0	0	0	8
10	2018-01-01 10:00:00	10	2	0	25	1	0	1	0	0	29
11	2018-01-01 11:00:00	11	6	0	93	1	0	0	0	0	100
12	2018-01-01 12:00:00	12	13	0	190	0	0	0	0	0	209
13	2018-01-01 13:00:00	13	20	0	292	8	0	0	0	0	320
14	2018-01-01 14:00:00	14	12	0	370	15	0	2	1	0	400
15	2018-01-01 15:00:00	15	24	0	521	15	0	3	0	1	565
16	2018-01-01 16:00:00	16	17	0	566	12	0	3	0	0	600
17	2018-01-01 17:00:00	17	9	0	593	16	0	3	0	0	624
18	2018-01-01 18:00:00	18	23	0	529	10	1	0	2	0	565
19	2018-01-01 19:00:00	19	14	0	343	6	1	0	0	0	365
20	2018-01-01 20:00:00	20	12	0	192	5	0	0	1	0	210
21	2018-01-01 21:00:00	21	7	0	127	4	0	2	0	0	140
22	2018-01-01 22:00:00	22	8	0	35	5	0	0	0	0	68
23	2018-01-01 23:00:00	23	4	0	32	0	1	0	0	0	37
24	2018-01-02 00:00:00	0	0	0	19	1	0	0	0	0	20
25	2018-01-02 01:00:00	1	2	0	8	2	0	0	0	0	12
26	2018-01-02 02:00:00	2	0	0	3	0	0	0	0	0	3
27	2018-01-02 03:00:00	3	0	0	1	0	0	0	0	0	1
28	2018-01-02 04:00:00	4	0	0	10	1	0	0	0	0	11
29	2018-01-02 05:00:00	5	1	0	17	2	0	0	0	0	20
30	2018-01-02 06:00:00	6	4	0	116	3	0	3	0	0	126
31	2018-01-02 07:00:00	7	17	0	196	11	0	1	0	0	225
32	2018-01-02 08:00:00	8	15	0	164	8	0	2	0	0	189
33	2018-01-02 09:00:00	9	9	0	214	10	0	2	4	0	239
34	2018-01-02 10:00:00	10	16	0	270	11	1	0	2	0	300
35	2018-01-02 11:00:00	11	20	0	383	23	0	7	1	0	435

Slika 8 Tablica prometnih podataka "PoKategorijama"

Za potrebe simulacije prometnih tokova na dionici autoceste Zagreb-Karlovac korišteni su podatci prikupljeni putem automatskog brojanja vozila. Odabrani su podaci za 18. kolovoza za smjer Zagreb i 2. kolovoza za smjer Karlovac jer su ti datumi zabilježili najveći broj vozila zbog intenziteta turističke sezone. Ovi podatci korišteni su kako bi se simulirao najgori slučaj zagušenja prometa i omogućila analiza prometa u uvjetima najvećeg opterećenja.



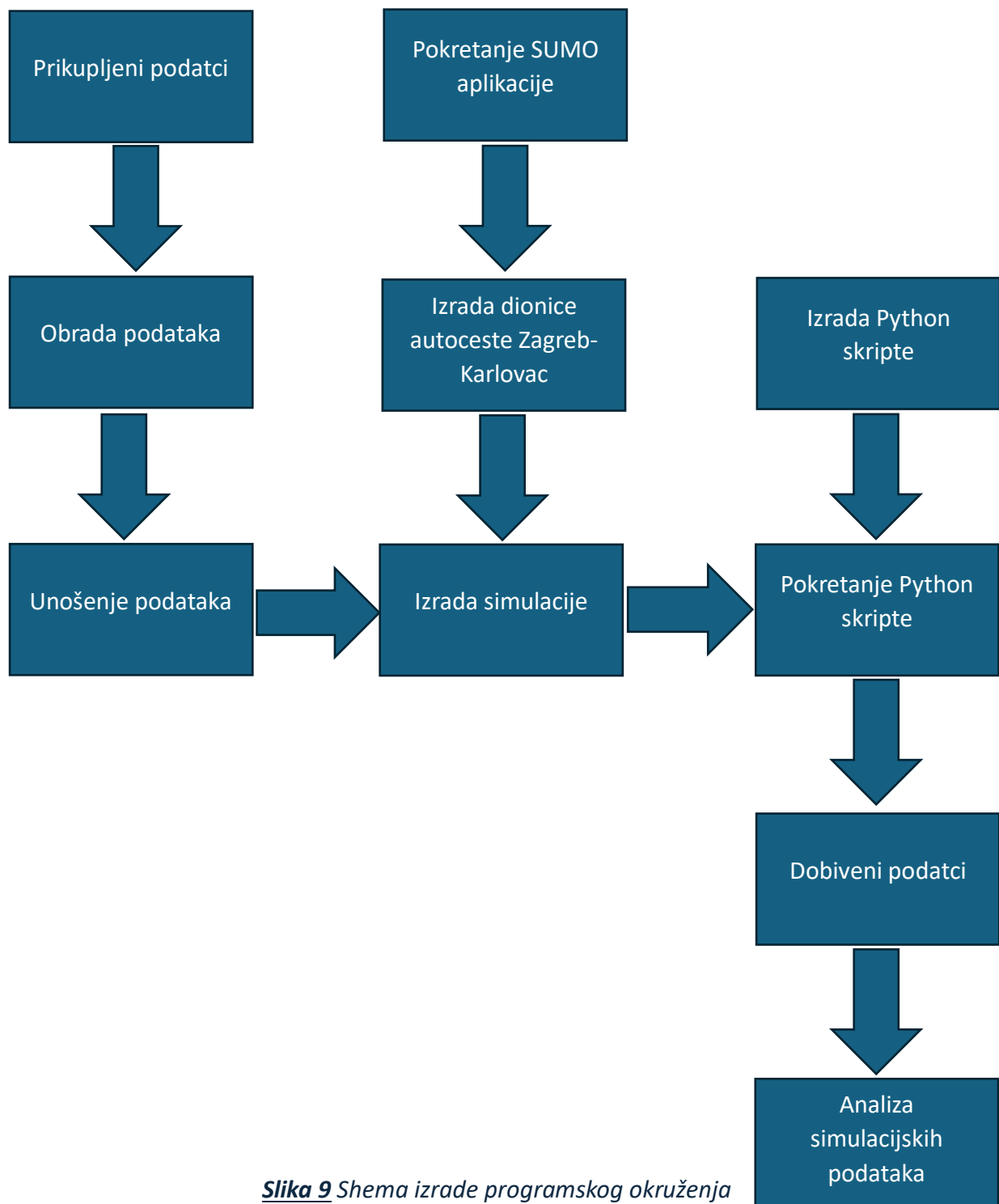
Grafikon 1 Prometni tok tijekom simulacije za smjer Karlovac



Grafikon 2 Prometni tok tijekom simulacije za smjer Zagreb

Grafikoni 1 i 2 prikazuju kako se prometni tok mijenja tijekom simulacije. Za smjer Karlovac prometni tok postepeno raste od ranih jutarnjih sati, s primjetnim porastom između 6 i 9 sati. Najveći promet se odvija između 14 i 18 sati, kada broj vozila dostiže vrhunac od preko 3000 voz/h. Nakon 18 sati, prometni tok počinje opadati i nastavlja padati do kraja dana. Za smjer Zagreb prometni tok je relativno nizak tijekom ranih jutarnjih sati, s porastom od 7 sati nadalje. Vrhunac prometnog toka dostiže se oko 12 sati, kada broj vozila prelazi 2500 voz/h. Prometni tok ostaje relativno visok i konstantan između 14 i 20 sati, s blagim opadanjem do kraja dana. U oba smjera najveći promet se događa tijekom poslijepodnevni sati, što je karakteristično za turističke sezone. Smjer Karlovac pokazuje izrazitiji vrhunac prometnog toka u popodnevnim satima, dok smjer Zagreb ima nešto uravnoteženiji tok tijekom dana. Pad prometnog toka nakon 18 sati ukazuje na smanjenje aktivnosti i prolazak vršnog opterećenja.

5. IZRADA PROGRAMSKOG OKRUŽENJA ZA SIMULACIJU



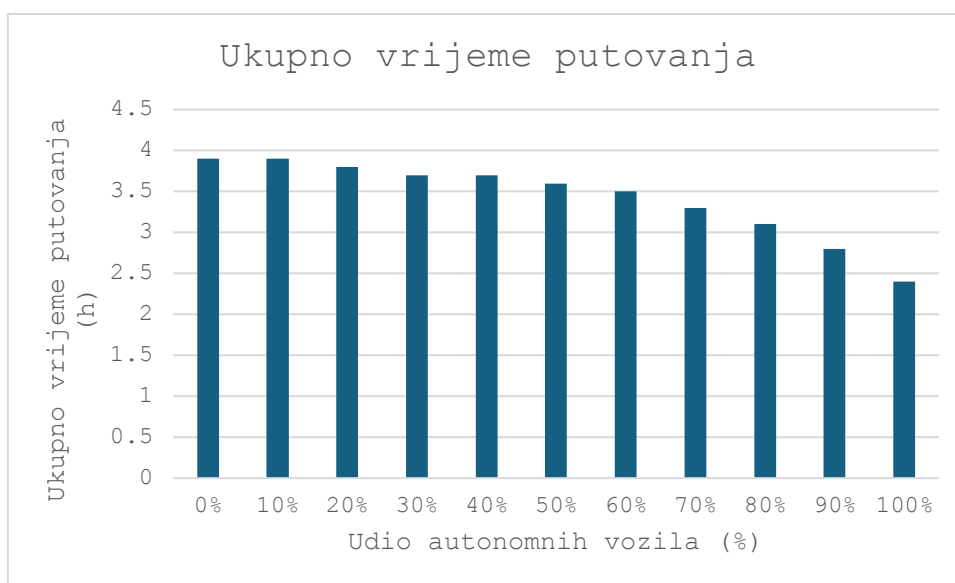
Slika 9 Shema izrade programskog okruženja

Slika 9 prikazuje shemu izrade simulacije. Prvi korak uključuje prikupljanje potrebnih podataka o prometu, odnosno dobiveni podatci o mjeranju prometa za dionicu autoceste Zagreb-Karlovac. Nakon prikupljenih podataka, podatci se obrađuju i pripremaju za unos u simulacijski model. Koristeći SUMO aplikaciju izrađuje se simulacija prometnog toka na dionici autoceste Zagreb-Karlovac. Ovaj korak uključuje modeliranje ceste i unosa svih relevantnih podataka kako bi simulacija bila što točnija. Nakon obrade, podatci se unose u simulator SUMO radi kreiranja realističnih prometnih tokova. U ovom slučaju, unose se podatci o broju vozila po satu, a također se postepeno mijenjaju postoci autonomnih vozila u odnosu na osobna vozila, dok broj ostalih vrsta vozila kao što su autobusi, motocikli i tegljači ostaju isti. Paralelno s izradom simulacije, izrađuje se Python skripta koja će analizirati rezultate simulacije. Skripta je dizajnirana da računa razne parametre prometa (npr. brzina, gustoća, protok, vrijeme putovanja, vrijeme slijeđenja, emisije štetnih plinova) dok se povećava udio autonomnih vozila u simulaciji. Simulacija se pokreće s različitim postotcima autonomnih vozila, počevši od 0%, pa do 100%, povećavajući udio u koracima (npr. 10%, 20%, itd.). Python skripta se pokreće paralelno sa simulacijom, prikupljajući i analizirajući rezultate. Nakon što su svi podatci prikupljeni putem simulacije i skripte, slijedi analiza simulacijskih podataka. Analiza se fokusira na promjene u prometu uzrokovane povećanjem udjela autonomnih vozila, sa ciljem razumijevanja kako ova vozila utječu na prometni tok i druge parametre prometa.

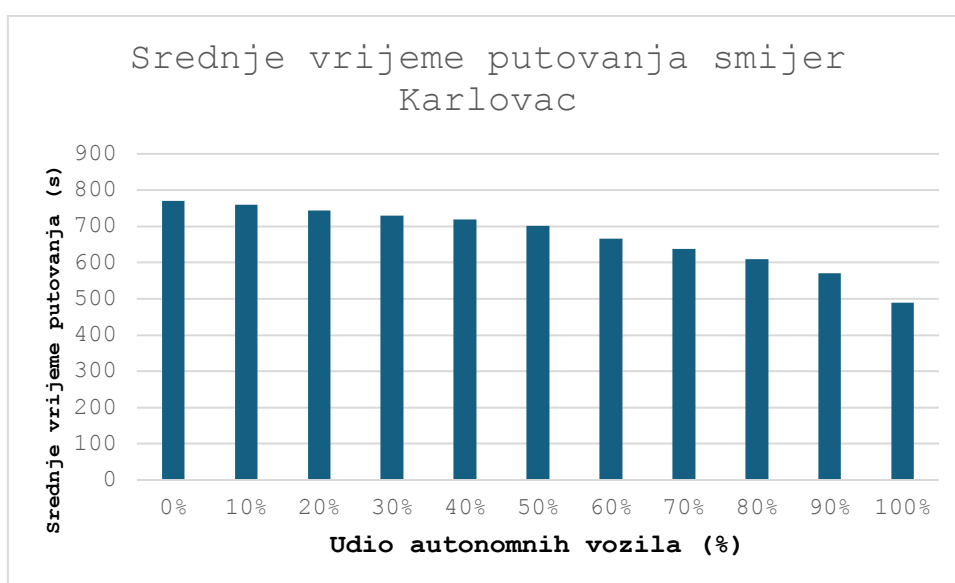
6. DOBIVENI REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije prometnih tokova na autocesti dionice Zagreb-Karlovac. Rezultati su prikazani kroz grafičke prikaze uz pripadajuće opise dani u nastavku ovog poglavlja.

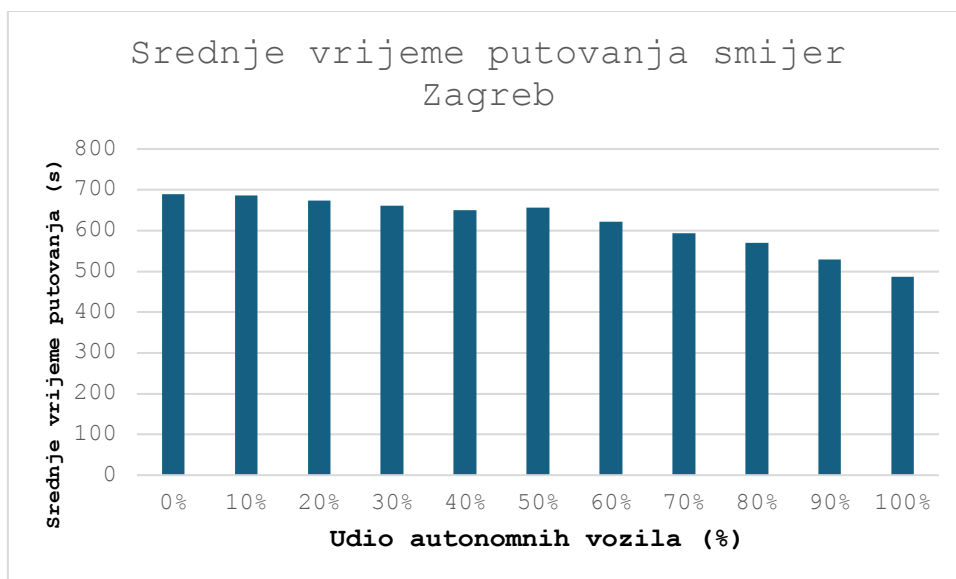
6.1. Vrijeme putovanja



Grafikon 3 Ukupno vrijeme putovanja



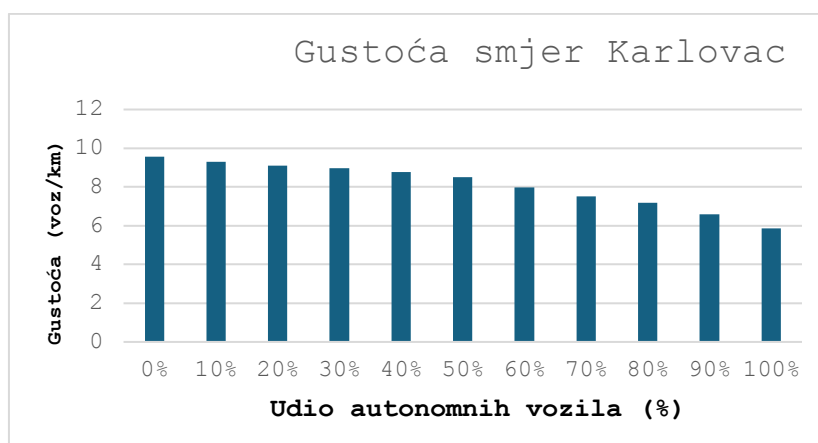
Grafikon 4 Srednje vrijeme putovanja smjer Karlovac



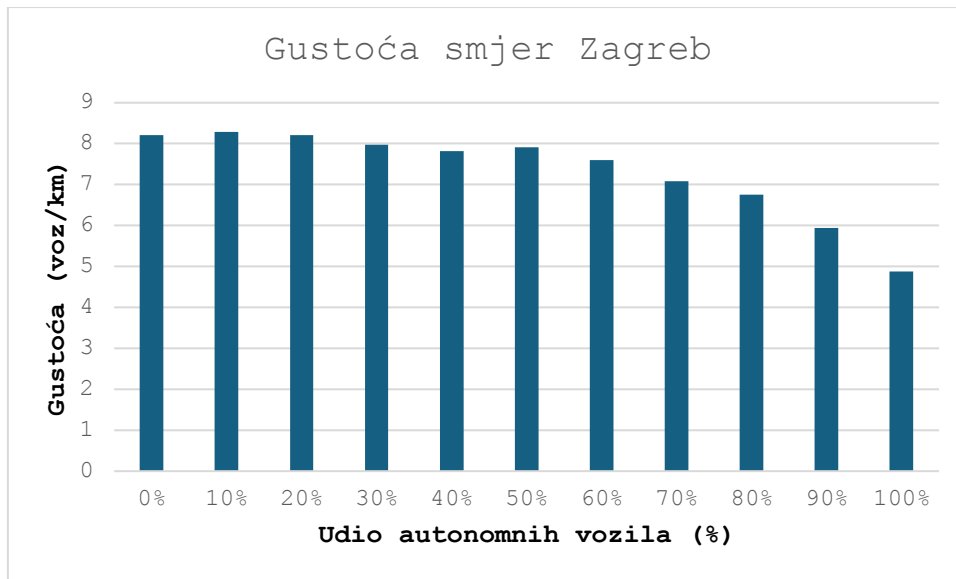
Grafikon 5 Srednje vrijeme putovanja smjer Zagreb

Iz grafikona 1, 2 i 3 se može vidjeti kako se povećava udio autonomnih vozila u prometu (smanjuje udio klasičnih ljudski upravljanih vozila), vrijeme potrebno vozilima da prođu promatrani dio ceste općenito se smanjuje. To može ukazivati na to da autonomna vozila, zbog optimiziranog načina vožnje, mogu smanjiti gužve i ubrzati protok prometa. Rezultati sugeriraju da mješoviti prometni tokovi s većim udjelom autonomnih vozila poboljšavaju efikasnost prometnog sustava, skraćujući vrijeme putovanja za sva vozila. Ovo može ukazivati na to da autonomna vozila ne samo da optimiziraju vlastito kretanje, već također pozitivno utječu na protok cestovnih vozila.

6.2. Gustoća prometa



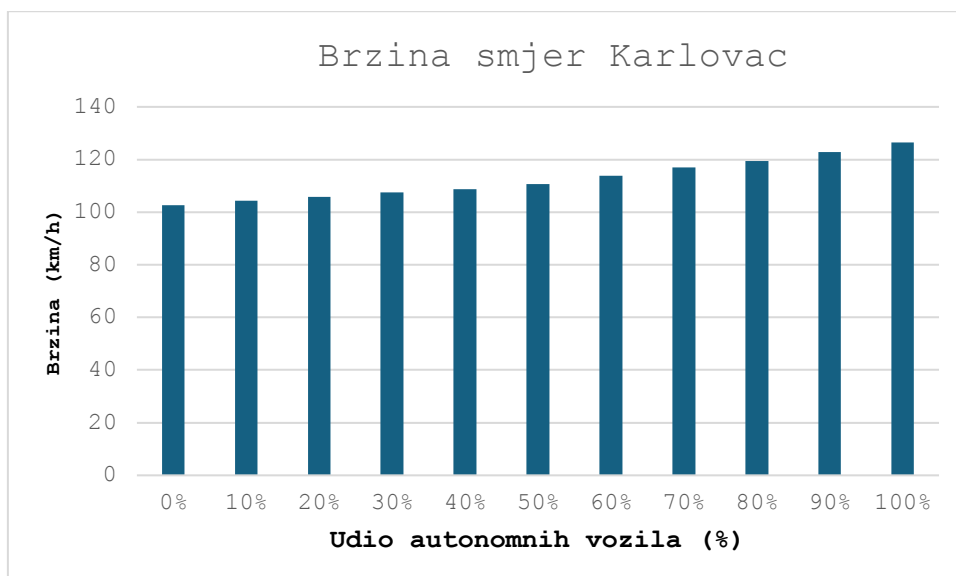
Grafikon 6 Gustoća smjer Karlovac



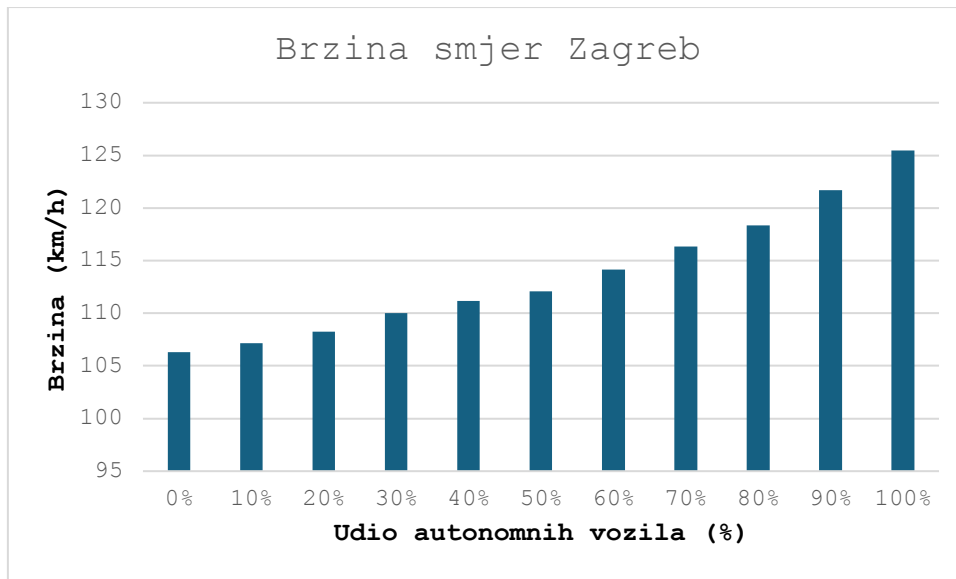
Grafikon 7 *Gustoća smjer Zagreb*

Grafikon 6 i 7 prikazuju kako postepenim povećanjem autonomnih vozila tijekom cijele simulacije pozitivno utječu na smanjenje gustoće prometa. S obzirom na to da se gustoća prometa smanjuje kako se povećava udio autonomnih vozila, može se pretpostaviti da autonomna vozila mogu optimizirati tok prometa i smanjiti zagušenja.

6.3. Brzina vožnje



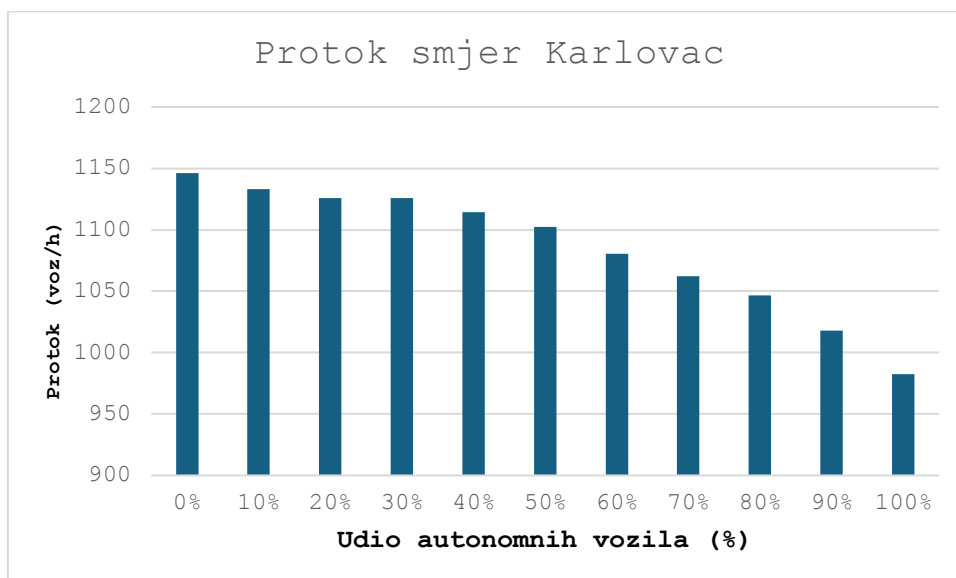
Grafikon 8 *Brzina smjer Karlovac*



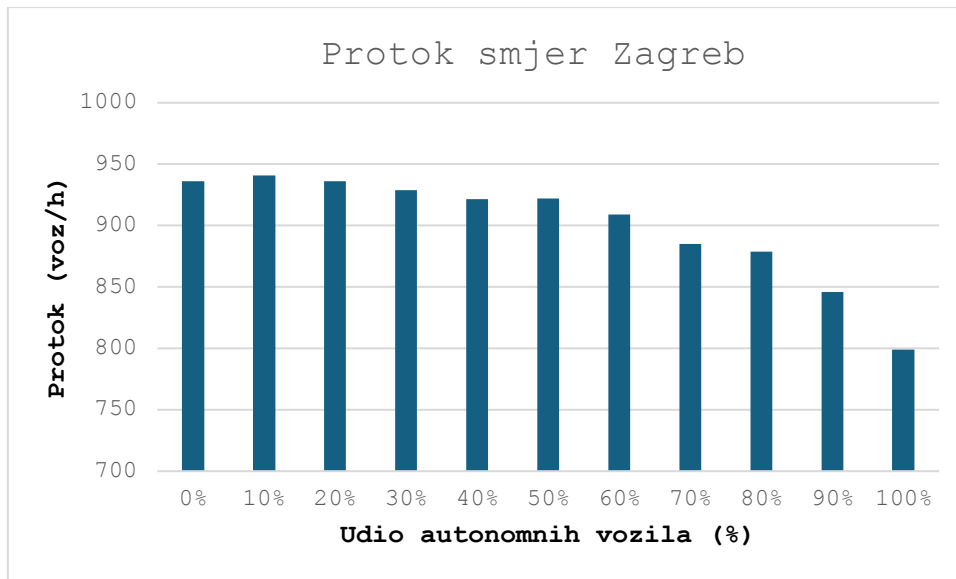
Grafikon 9 Brzina smjer Zagreb

Iz grafikona 8 i 9 možemo utvrditi kako se prosječna brzina tijekom cijele simulacije mijenja s povećanjem udjela autonomnih vozila u prometu. U scenarijima s većim udjelom autonomnih vozila, očekivalo bi se da se brzina poveća zbog boljeg upravljanja prometnim tokom i smanjenja zagušenja. Ako brzine ostaju stabilne ili se povećavaju kako se udio autonomnih vozila povećava, to bi moglo značiti da autonomna vozila poboljšavaju efikasnost prometa.

6.4. Protok vozila



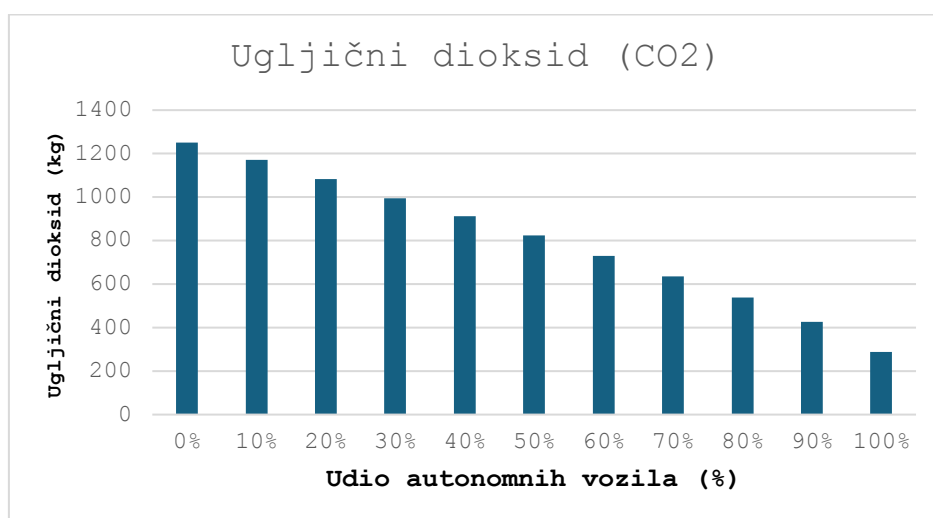
Grafikon 10 Protok smjer Karlovac



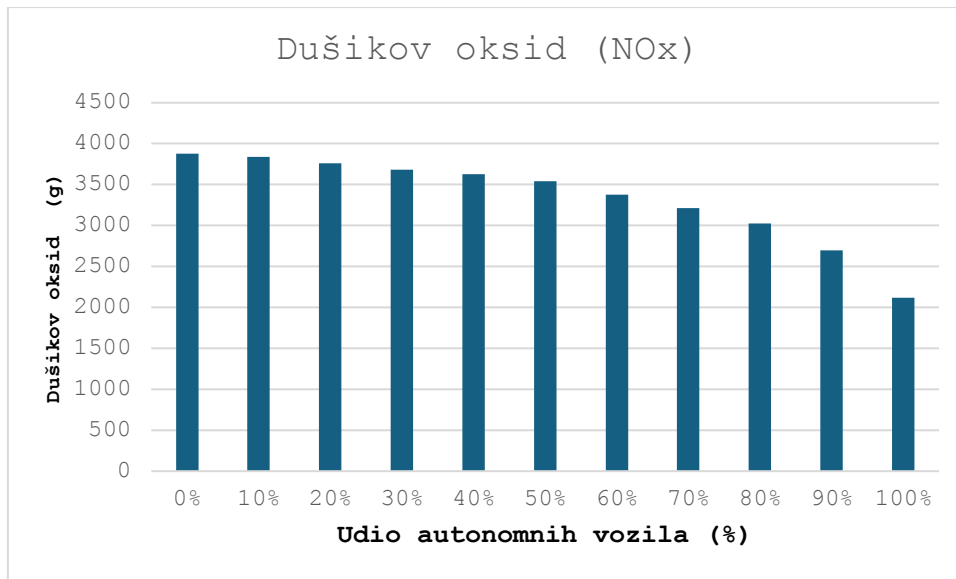
Grafikon 11 Protok smjer Zagreb

Protok vozila je izravno povezan s gustoćom i brzinom vožnje. Visok protok obično znači da se vozila kreću brzo i u velikom broju, dok nizak protok može ukazivati na zagušenja ili smanjenje brzine. U ovom slučaju kao što je vidljivo na grafikonu 10 i 11 protok se smanjuje udjelom autonomnih vozila jer iz grafikona 8 i 9 možemo vidjeti da se brzina povećava, a iz grafikona 6 i 7 možemo vidjeti da se gustoća smanjuje što znači da se vozila kraće zadržavaju na promatranom presjeku autoceste.

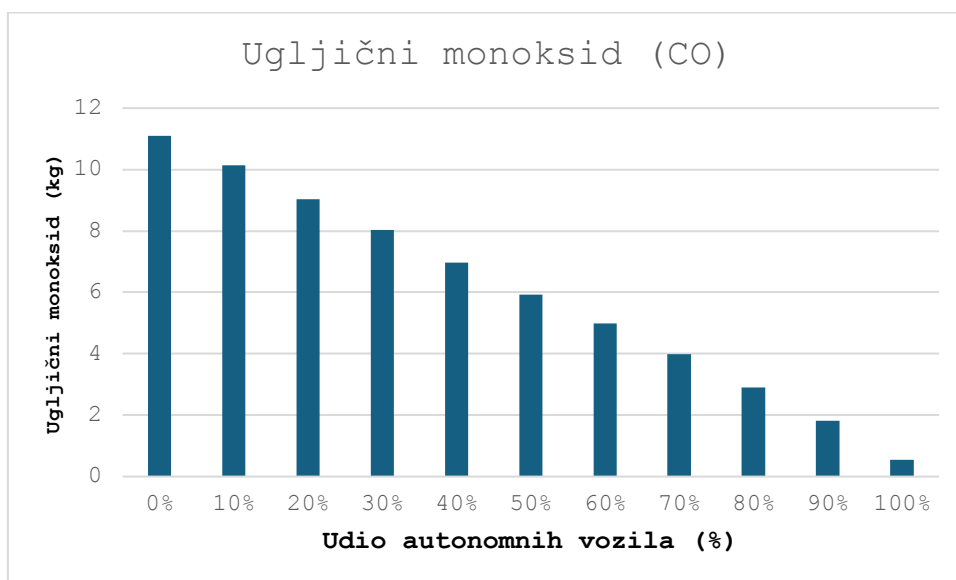
6.5. Emisije ugljičnog dioksida, dušikovog oksida i ugljičnog monoksida



Grafikon 12 Ugljični dioksid



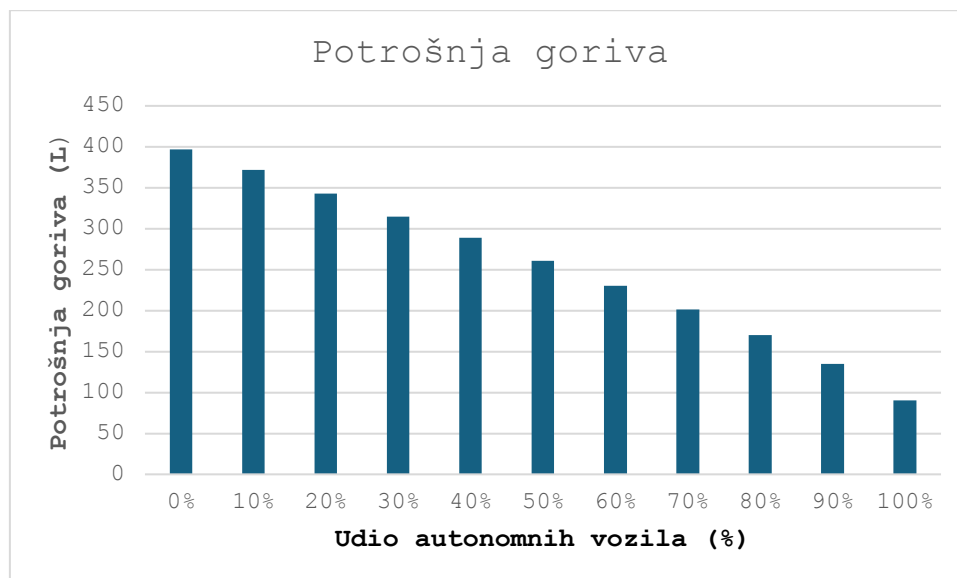
Grafikon 13 Dušikov oksid



Grafikon 14 Ugljični monoksid

Grafikoni 12, 13 i 14 pokazuju promjene u emisiji CO₂, NOx i CO s različitim udjelima autonomnih vozila, možemo zaključiti kako autonomna vozila pozitivno utječu na emisije jer koriste električni pogon. Smanjenje emisije CO₂, NOx i CO je ključno za okoliš, a to bi bio značajan argument za širu implementaciju takvih tehnologija u prometu.

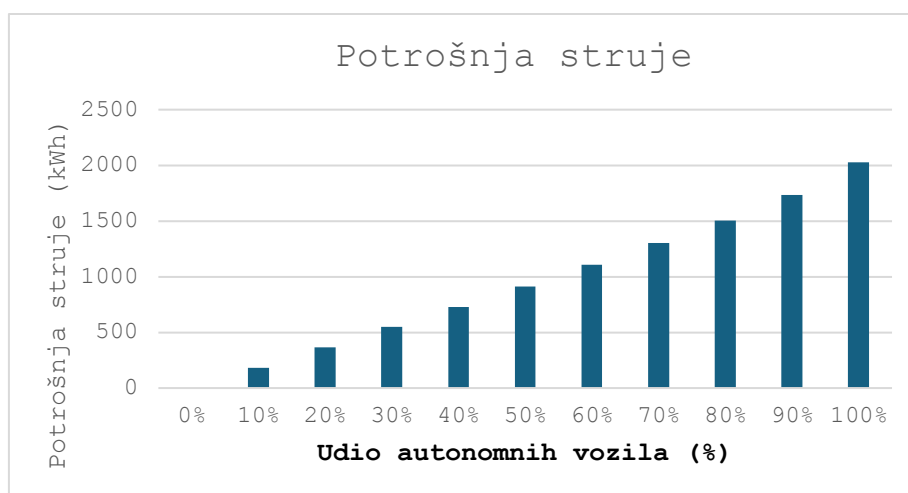
6.6. Potrošnja goriva



Grafikon 15 Potrošnja goriva

Podatci prikazani grafikonom 15 pokazuju smanjenje potrošnje goriva s povećanjem udjela autonomnih vozila jer koriste pogon na električnu energiju.

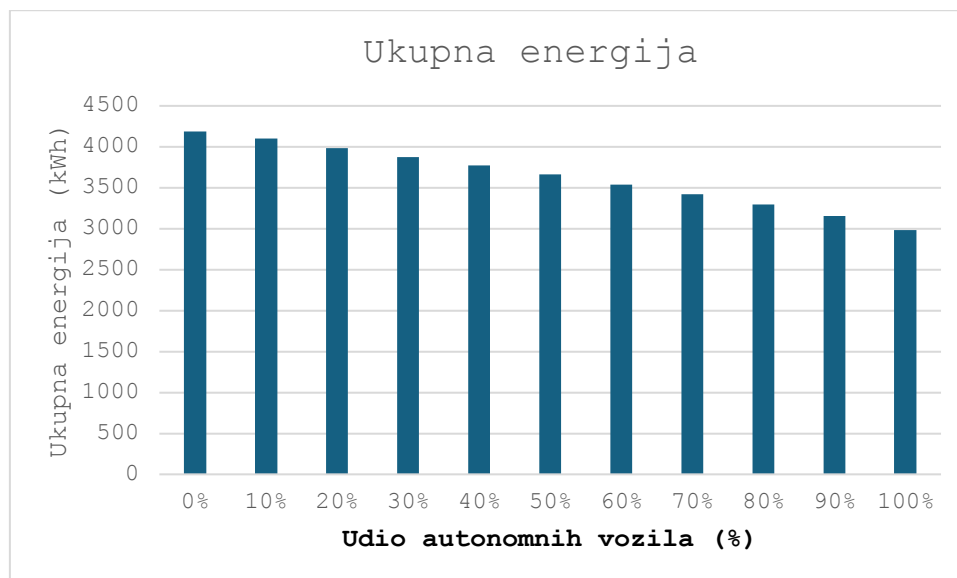
6.7. Potrošnja električne energije kod električnih vozila



Grafikon 16 Potrošnja električne struje kod električnih vozila

Kako se povećava uvođenje CAV vozila dolazi do povećanja potrošnje električne energije kao što je vidljivo na grafikonu 16 jer autonomna vozila koriste pogon na struju. Najveća prednost je što se smanjuje lokalna emisija štetnih plinova.

6.8. Ukupna energija



Grafikon 17 Ukupna energija

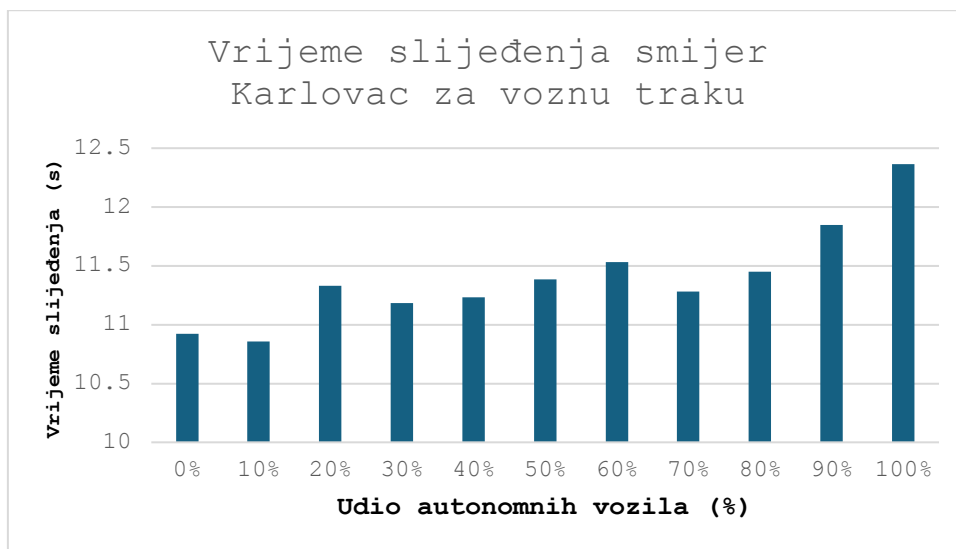
Grafikon 17 pokazuje kako se ukupna potrošnja energije smanjuje s povećanjem udjela autonomnih vozila, to može značiti da su autonomna vozila energetske efikasnija. Smanjenje ukupne potrošnje energije pozitivno utječe na okoliš, posebno ako dolazi od smanjenja potrošnje goriva. Ako autonomna vozila doprinose smanjenju ukupne potrošnje energije, to bi bio značajan korak prema održivijem prometnom sustavu. Kako bismo izračunali ukupnu energiju potrošenu u prometnom toku, prvo uzimamo omjer vozila na fosilna goriva preuzeto iz podataka Državnog zavoda za statistiku [10]. Prema podacima iz [10], u prometnom toku vozila s benzinskim gorivom čine 30,7%, dok vozila s dizel pogonom čine 69,3% ukupnog broja vozila. Zatim ćemo pretvoriti potrošnju goriva u energiju odnosno 1 l je jednaka 9,61 kWh za benzin dok je 1 l jednaka 10,96 kWh za dizel. Konačno, dodat ćemo energiju autonomnih vozila (električnih) kako se njihov udio povećava. Izračun ukupne energije možemo pomoću slijedeće formule (2):

$$E_{ukupno} = (L_{benzin} \times 9,61) + (L_{dizel} \times 10,96) + E_{autonomna} \quad , \quad (2)$$

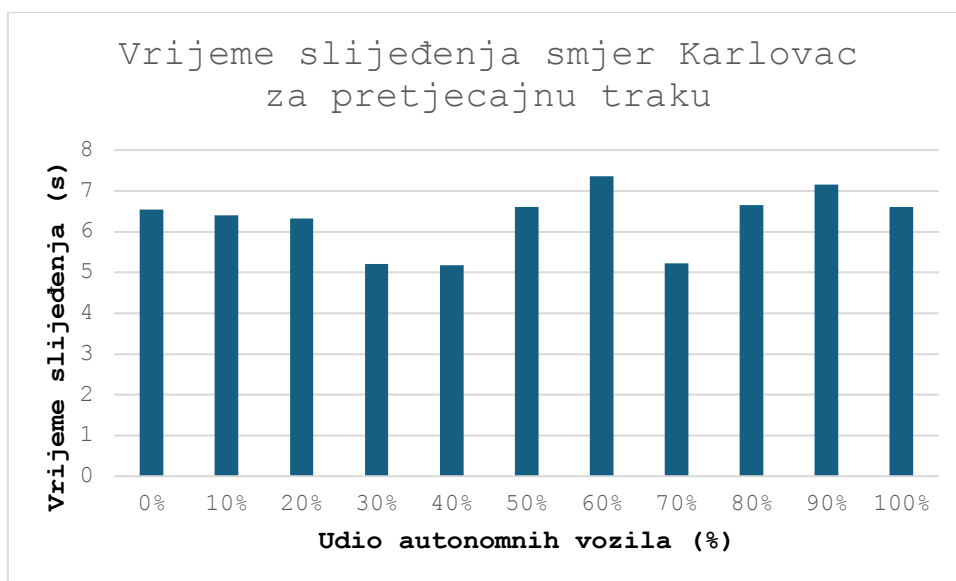
gdje varijable imaju slijedeće značenje:

- E_{ukupno} – ukupna potrošnja energije (kWh);
- L_{benzin} – potrošnja benzina (l);
- L_{dizel} – potrošnja dizela (l);
- $E_{autonomna}$ – ukupna potrošnja energije autonomnih vozila (kWh).

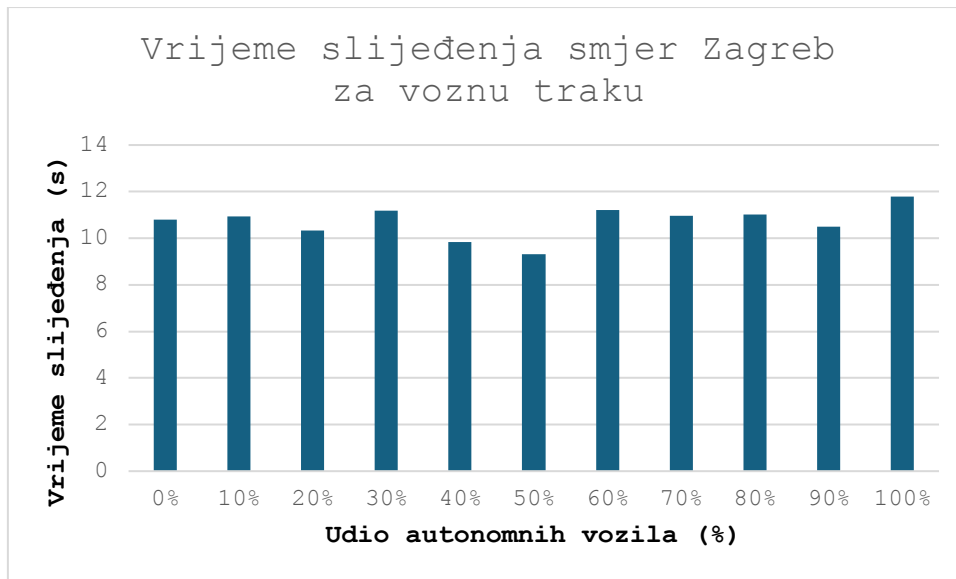
6.9. Vrijeme slijeđenja



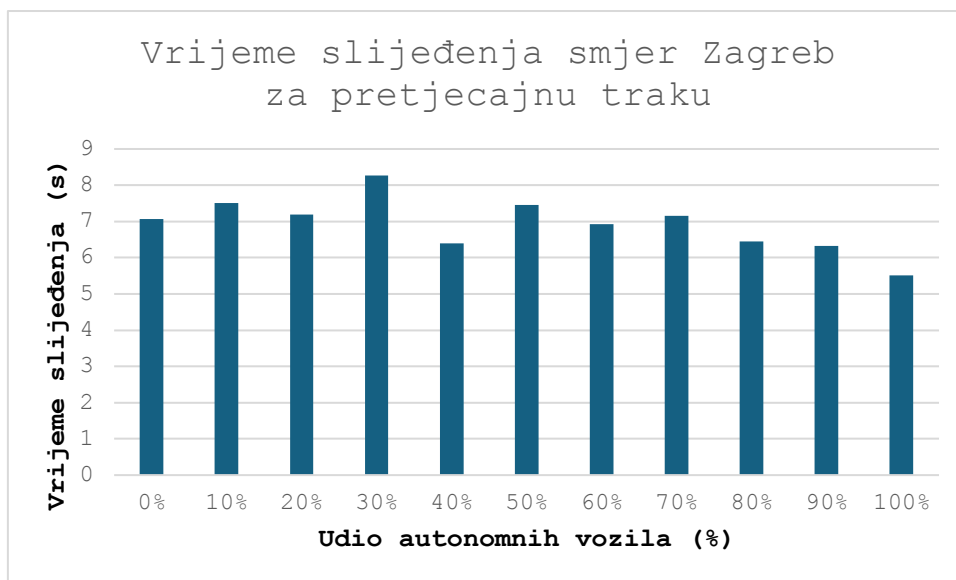
Grafikon 18 Vrijeme slijeđenja smjer Karlovac za voznu traku



Grafikon 19 Vrijeme slijeđenja smjer Karlovac za pretjecajnu traku



Grafikon 20 Vrijeme slijeđenja smjer Zagreb za voznu traku



Grafikon 21 Vrijeme slijeđenja smjer Zagreb za pretjecajnu traku

Grafikoni 18, 19, 20 i 21 prikazuju prosječno vrijeme slijeđenja između vozila tijekom cijele simulacije. Vrijeme slijeđenja (razmak između vozila) je ključan faktor sigurnosti u prometu. S povećanjem udjela autonomnih vozila, očekuje se da će se vrijeme slijeđenja prilagoditi na optimalan način. Ako podatci pokazuju da se vrijeme slijeđenja smanjuje s povećanjem udjela autonomnih vozila, to može ukazivati na to da autonomna vozila održavaju manji, ali siguran razmak između vozila zbog preciznijeg upravljanja i primijenjene tehnologije brzog mjerenja stanja okoline oko vozila. Ako vrijeme slijeđenja ostaje konzistentno tijekom različitih vremenskih intervala, to može ukazivati na stabilan prometni tok bez velikih promjena u brzini ili gustoći prometa. Velike varijacije u vremenu slijeđenja mogu sugerirati promjene u uvjetima na cesti ili u načinu vožnje, što može utjecati na sigurnost i učinkovitost prometa.

Optimalno vrijeme slijeđenja može pomoći u smanjenju potrošnje goriva i emisije CO₂, jer smanjuje potrebu za naglim ubrzavanjima i usporavanjima. Ako autonomna vozila održavaju optimalno vrijeme slijeđenja, to može doprinijeti povećanju energetske efikasnosti u prometu.

7. ZAKLJUČAK

Provedene simulacije prometnih tokova na autocesti Zagreb-Karlovac pokazale su značajan utjecaj autonomnih vozila na različite aspekte prometnog sustava. Rezultati sugeriraju da povećanje udjela autonomnih vozila može dovesti do smanjenja vremena putovanja, smanjenja gustoće prometa, te povećanja prosječne brzine, čime se smanjuje ukupna protočnost prometa. Nadalje, autonomna vozila doprinose smanjenju emisija štetnih plinova kao što su CO₂, NO_x i CO, te smanjenju potrošnje goriva, što pozitivno utječe na okoliš. Istovremeno smanjuju potrošnju energije, što ukazuje na energetske efikasnost autonomnih vozila. Konačno, analiza vremena slijeđenja ukazuje na poboljšanje sigurnosti u prometu, dok manji razmaci između vozila nisu ugrozili sigurnost zahvaljujući naprednim tehnologijama koje koriste autonomna vozila. Integracija autonomnih vozila u prometne sustave može značajno poboljšati efikasnost, sigurnost i održivost cestovnog prometa.

Važno je napomenuti da je ova analiza provedena na autocesti, gdje prometni tokovi imaju jednostavnije ponašanje u usporedbi s gradskim sredinama. U gradskim područjima, mješoviti prometni tokovi cestovnih vozila, koji uključuju kombinaciju autonomnih, umreženih autonomnih i klasičnih vozila, mogu pokazivati kompleksnije interakcije zbog većeg broja čimbenika poput pješaka, biciklista, i različitih tipova raskrižja. Stoga je nužna daljnja analiza kako bi se bolje razumjelo ponašanje mješovitih prometnih tokova u gradskim sredinama, gdje se očekuje da će autonomna vozila imati različit utjecaj na prometni sustav u usporedbi s autocestama.

LITERATURA

- [1] Vrbanić F. Ivanjko E. Kušić K. Čakija D. Traffic Flow Simulators with Connected and Autonomous Vehicle: A Short Review. *Transformation of Transportation*. 2021; 213: 15-30. Preuzeto s: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-66464-0_2 [Pristupljeno: lipanj 2024]
- [2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington, DC: The National Academies Press; 2022.
- [3] Hozjak D. Novačko L. Babojelić K. *UPORABNI POKAZATELJI CESTE*. Kolegij Cestovne prometnice 1 Fakultet prometnih znanosti Sveučilište u Zagrebu; 2024. Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2023-2024/my/courses.php> [Pristupljeno: kolovoz 2024]
- [4] Mandžuka S. Gregurić M. Ivanjko E. Kušić K. *Primjeri jednostavnih upravljačkih sustava*. Kolegij Automatsko upravljanje u prometu i transportu Fakultet prometnih znanosti Sveučilište u Zagrebu; 2024. Preuzeto s: literatura dobivena od strane mentora [Pristupljeno: rujan 2024]
- [5] Dadić I. Kos G. Ševrović M. *Teorija prometnog toka*. Zagreb; 2014. Preuzeto s: <https://www.fpz.unizg.hr/file/268442f4d235db64317d99e7d5384e29.pdf>
- [6] Cerovac V. *Tehnika i sigurnost prometa*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilište u Zagrebu; 2001.
- [7] Thinktransportation. *Traffic Simulation: A Powerful Tool for Better Transportation Planning*. Preuzeto s: <https://thinktransportation.net/traffic-simulations-software-a-comparison-of-sumo-ptv-vissim-aimsun-and-cube/> [Pristupljeno: rujan 2024]
- [8] Hrvatske ceste. *Brojanje prometa*. Preuzeto s: <https://hrvatske-cestes.hr/hr/stranice/promet-i-sigurnost/dokumenti/14-brojanje-prometa> [Pristupljeno: kolovoz 2024.]
- [9] Slavulj M. *Analiza prometnih tokova autoceste Zagreb-Karlovac primjenom neuronskih mreža*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2021. Preuzeto s: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:687508> [Pristupljeno: lipanj 2024.]
- [10] Državni zavod za statistiku. *Obujam cestovnog prometa domaćih vozila*. Preuzeto s: <https://podaci.dzs.hr/2024/hr/77314> [Pristupljeno: rujan 2024]

POPIS SLIKA

Slika 1 Prikaz gustoće prometnog toka za različit iznos LoS-a [3].....	3
Slika 2 Prikaz grafikona s krivuljama koje predstavljaju brzine i razine usluga [3]	5
Slika 3 Poprečni presjek autoceste [3]	6
Slika 4 Prikaz PTV VISSIM simulacijskog sučelja [7]	9
Slika 5 Prikaz SUMO simulacijskog sučelja [7]	10
Slika 6 Prikaz AIMSUN Next simulacijskog sučelja [7].....	11
Slika 7 Tablica prometnih podataka "PoBrzinama"	14
Slika 8 Tablica prometnih podataka "PoKategorijama".....	14
Slika 9 Shema izrade programskog okruženja	16

POPIS TABLICA

Tablica 1 LoS za autoceste definiran pomoću gustoće prometnog toka [4]	4
Tablica 2 Prikaz razina automatizacije [1]	7

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1 Prometni tok tijekom simulacije za smjer Karlovac	15
Grafikon 2 Prometni tok tijekom simulacije za smjer Zagreb.....	15
Grafikon 3 Ukupno vrijeme putovanja	18
Grafikon 4 Srednje vrijeme putovanja smjer Karlovac.....	18
Grafikon 5 Srednje vrijeme putovanja smjer Zagreb	19
Grafikon 6 Gustoća smjer Karlovac	19
Grafikon 7 Gustoća smjer Zagreb	20
Grafikon 8 Brzina smjer Karlovac	20
Grafikon 9 Brzina smjer Zagreb	21
Grafikon 10 Protok smjer Karlovac	21
Grafikon 11 Protok smjer Zagreb	22
Grafikon 12 Ugljični dioksid.....	22
Grafikon 13 Dušikov oksid	23
Grafikon 14 Ugljični monoksid.....	23
Grafikon 15 Potrošnja goriva	24
Grafikon 16 Potrošnja električne struje kod električnih vozila.....	24
Grafikon 17 Ukupna energija.....	25
Grafikon 18 Vrijeme slijeđenja smjer Karlovac za voznu traku	26
Grafikon 19 Vrijeme slijeđenja smjer Karlovac za pretjecajnu traku	26
Grafikon 20 Vrijeme slijeđenja smjer Zagreb za voznu traku	27
Grafikon 21 Vrijeme slijeđenja smjer Zagreb za pretjecajnu traku	27

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

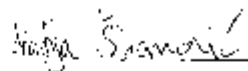
IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad
(ovaj rad)
isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i uslađa 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 nerচিতаног 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 Programska podrška za simulaciju prometnih tokova na autocestama, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu, 11.09.2024.

Student/ica:


(ime i prezime, potpis)