

# Utjecaj automatiziranog grupiranja vozila na performanse prometnog toka

---

Oštrić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:900864>

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

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



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**IVA OŠTRIĆ**

**UTJECAJ AUTOMATIZIRANOG GRUPIRANJA VOZILA  
NA PERFORMANSE PROMETNOG TOKA**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**UTJECAJ AUTOMATIZIRANOG GRUPIRANJA VOZILA  
NA PERFORMANSE PROMETNOG TOKA  
IMPACT OF AUTOMATED VEHICLE PLATOONING ON  
THE TRAFFIC FLOW PERFORMANCE  
DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Planiranje kopnenih prometnih sustava

Mentor: izv. prof. dr. sc. Siniša Vilke

Komentor: Tomislav Krljan, mag. ing. traff.

Studentica: Iva Oštrić

Studijski smjer: Tehnologija i organizacija prometa

JMBAG: 0112066905

Rijeka, srpanj 2022.

Studentica: Iva Oštrić

Studijski program: Tehnologija i organizacija prometa

JMBAG: 0112066905

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

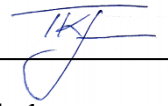
Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom  
**UTJECAJ AUTOMATIZIRANOG GRUPIRANJA VOZILA NA PERFORMANSE  
PROMETNOG TOKA**

---

izradila samostalno pod mentorstvom  
izv. prof. dr. sc. Siniše Vilkea



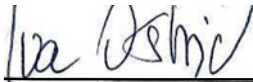
te komentorstvom Tomislava Krljana mag. ing. traff.



stručnjaka iz tvrtke Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristila literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Studentica



Ime i prezime

Student/studentica: Iva Oštrić

Studijski program: Tehnologija i organizacija prometa

JMBAG: 0112066905

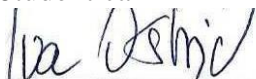
## IZJAVA STUDENTA – AUTORA

### O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima Creative Commons licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>.

Studentica



Ime i prezime

## SAŽETAK

Prometni sustav ključan je za društvo i gospodarstvo, a najveći udio ukupnog prometa zauzima cestovni promet. Kao rezultat rasta obujma prometa stvara se povećana potrošnja goriva, kao i emisije stakleničkih plinova. Inteligentnim transportnim rješenjima postiže se znatno poboljšanje navedenog onečišćenja okoliša, ali i općenito poboljšanje odvijanja prometa, učinkovitiji prijevoz putnika i robe, poboljšanje sigurnosti u prometu te udobnosti i zaštite putnika. ACC i CACC sustavi za kontrolu vožnje aktualni su koncepti definirani unutar ITS-a bitni za postizanje navedenih performansi u prometu. S druge strane da bi se ispitali spomenuti sustavi za kontrolu vožnje, simulacijski modeli uvelike su zastupljeni u razmatranju pozitivnih učinaka *Platooning* koncepta u kontekstu zaštite okoliša. Rezultati pokazuju da nije potrebno provoditi konkretan eksperiment kako bi se testirali njegovi utjecaji na okoliš. Cilj ovog rada je istražiti i proučiti aktualnosti u istraživanju koncepta tehnologije simulacije s obzirom na kriterije prihvatljivosti, isplativosti i učinkovitosti.

Ključne riječi: ACC, CACC, inteligentni transportni sustavi, *platooning*, prometni tok

## SUMMARY

The transport system is crucial for society and the economy, and the largest share of total traffic is road traffic. As a result of the growth in the volume of traffic, increased fuel consumption is created, as well as greenhouse gas emissions. Intelligent transport solutions achieve a significant improvement of the mentioned environmental pollution, but also a general improvement of traffic flow, more efficient transport of passengers and goods, improvement of traffic safety and comfort and protection of passengers. ACC and CACC driving control systems are current concepts defined within ITS essential for achieving the stated traffic performance. On the other hand, in order to examine the mentioned driving control systems, simulation models are widely represented in the consideration of the positive effects of the *Platooning* concept in the context of environmental protection. The results show that it is not necessary to conduct a specific experiment to test its environmental impacts. The aim of this paper is to investigate and study current events in the research of the concept of simulation technology with regard to the criteria of acceptability, cost-effectiveness and efficiency.

Keywords: ACC, CACC, intelligent transport systems, *platooning*, traffic flow

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK</b> .....	<b>I</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>I</b>
<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>II</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA.....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	1
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	2
1.5. STRUKTURA RADA .....	2
<b>2. TEMELJNE TEHNIČKO-TEHNOLOŠKE POSTAVKE GUPIRANOG NIZA VOZILA</b> .....	<b>3</b>
2.1. PREDUVJETI ZA AUTOMATIZIRANO GRUPIRANJE I KRETANJE VOZILA.....	3
2.2. SUSTAVI ZA KONTROLU VOŽNJE .....	10
2.2.1. Osnovni sustav za kontrolu vožnje .....	10
2.2.2. Adaptivni sustav za kontrolu vožnje .....	11
2.2.3. Kooperativno adaptivni sustav za kontrolu vožnje .....	12
2.3. KOMUNIKACIJSKE TEHNOLOGIJE ZA POVEZIVANJE VOZILA .....	13
2.3.1. Komunikacijska tehnologija na razini vozilo-sve (V2X) .....	14
2.3.2. Komunikacijska tehnologija na razini vozilo-vozilo (V2V).....	17
2.3.3. Komunikacijska tehnologija na razini vozilo-infrastruktura (V2I).....	19
<b>3. TESTIRANJE I INTEGRACIJA PLATOONING KONCEPTA U DOMENI CESTOVNOG PROMETA</b> .....	<b>22</b>
3.1. MOGUĆNOSTI TESTIRANJA PLATOONING KONCEPTA PRIMJENOM SIMULACIJSKIH ALATA.....	23
3.2. TESTIRANJA U DOMENI PLATOONING KONCEPTA PRIMJENOM MIKROSKOPSKIH PROMETNIH MODELA .....	24
3.2.1. Analiza ponašanja međusobno povezanih vozila u <i>Platoonu</i> .....	24
3.2.2. Integracija vozila s već postojećim nizom vozila na raskrižju upravljanog signalnim uređajima .....	26
3.2.3. Grupiranje <i>Platoona</i> s vozilima koja imaju različito odredište .....	27
3.2.4. Scenarij grupiranja <i>Platoona</i> na primjeru ne signaliziranog raskrižja i nedovoljnom (otežanom) preglednošću .....	29
3.2.5. Spajanje dvaju već grupiranih <i>Platoona</i> uslijed radova na cesti.....	30
3.2.6. Scenarij prolaska raskrižja CACC vozila.....	32
<b>4. AKTUALNA ISTRAŽIVANJA U DOMENI PLATOONING KONCEPTA</b> .....	<b>34</b>
4.1. PROJEKT CHAUFFEUR.....	34
4.2. PROJEKT PATH.....	35

4.3. PROJEKT ENERGY ITS .....	36
4.4. PROJEKT „GRAND COOPERATIVE DRIVING CHALLENGE“ .....	39
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>42</b>
<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>44</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>47</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>48</b>



# 1. UVOD

## 1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA

Na osnovi temeljnih činjenica može se definirati problem istraživanja: povećanje broja vozila, a samim time i povećana potrošnja goriva, koja negativno utječe, tj. zagađuje okoliš i zrak je sve intenzivniji problem ne samo u pogledu odvijanja prometa, već i spomenutih enormnih zagađenja i zagušenja. S obzirom na relevantne spoznaje o prethodno navedenom problemu istraživanja, moguće je definiranje predmeta istraživanja: istražiti i prikazati aktualna istraživanja čimbenika te na koji utječu na funkcionalnost *platooning* koncepta, utvrditi važnost *platooning* koncepta u prometnom toku, ocijeniti i prikazati utjecaj integracije *platooning* koncepta na odvijanje svakidašnjeg prometa te na zagađenje okoliša i zraka emisijama. Problem i predmet istraživanja obuhvaćaju te povezuju dva međusobno povezana objekta istraživanja: povećanje broja vozila i integracija *platooning* koncepta u prometni tok.

## 1.2. RADNA HIPOTEZA

Prema bitnim odrednicama problema, predmeta i objekta istraživanja postavljena je sljedeća radna hipoteza: primjenom i integracijom *Platooning* koncepta moguće je utjecati na smanjenje potrošnje goriva u cestovnom prometu i zagađenje okoliša i zraka te povećanje sigurnosti u prometu.

## 1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha i cilj ovog istraživanja, na temelju prikupljenih podataka o integriranju *platooning* koncepta u svakidašnji prometni tok, je utvrditi važnost spomenutog koncepta u cestovnom prometu, prikazati aktualnim istraživanjima moguće scenarije ukoliko dođe do integracije navedenog koncepta, predstaviti prednosti i nedostatke istog koncepta te predložiti integracijske i razvojne smjernice.

Pitanja na koja će se odgovoriti u ovom diplomskom radu su:

- 1) Što je *platooning* koncept?
- 2) Zašto je važan *platooning* koncept?
- 3) Na koji način funkcionira *platooning* koncept?
- 4) Na koji način su povezana vozila u *Platoonu*?
- 5) Kako komuniciraju vozila u *Platoonu*?
- 6) Koje su prednosti, a koji nedostaci *platooning* koncepta?

- 7) Koji su mogući izazovi uslijed integracije *platooning* koncepta sa svakidašnjim prometom?
- 8) Koja su aktualna istraživanja *platooning* koncepta?

#### **1.4. ZNANSTVENE METODE**

Prilikom istraživanja i predstavljanja rezultata istraživanja korištene su u odgovarajućim kombinacijama sljedeće znanstvene metode: metoda sinteze i analize, metoda dedukcije i indukcije, metoda dokazivanja, metoda klasifikacije, metoda deskripcije, metoda komparacije te metoda kompilacije.

#### **1.5. STRUKTURA RADA**

Strukturu diplomskog rada predstavlja šest međusobno povezanih poglavlja.

U prvom dijelu, „**UVOD**“, navedeni su problem, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza, svrha i ciljevi istraživanja, znanstvene metode te je obrazložena struktura rada.

U drugom poglavlju pod naslovom „**TEMELJNE TEHNIČKO-TEHNOLOŠKE POSTAVKE GRUPIRANOG NIZA VOZILA**“, objašnjava konvojski način povezivanja i kretanja vozila u nizu, sustave koji su važni za kontrolu vožnje te način povezanosti, tj. komunikacijske tehnologije u navedenom grupiranom nizu između vozila.

Naslov trećeg dijela je „**TESTIRANJE I INTEGRACIJA PLATOONING KONCEPTA U CESTOVNOM PROMETU**“, a sadrži mogućnosti testiranja navedenog koncepta, primjere provedenih testiranja i analize mogućih scenarija u svakodnevnom prometu s naglaskom na koncept *platooninga* u svim scenarijima.

Nadalje, „**AKTUALNA ISTRAŽIVANJA U DOMENI PLATOONING KONCEPTA**“, naslov je četvrtog poglavlja ovog rada, a sadržava analizu već provedenih projekata. Točnije, analiziran je sam koncept *platooninga*.

Unutar posljednjeg dijela pod naslovom „**ZAKLJUČAK**“ navedeni su rezultati istraživanje kojima je dokazivana ranije postavljena radna hipoteza.

## **2. TEMELJNE TEHNIČKO-TEHNOLOŠKE POSTAVKE GUPIRANOG NIZA VOZILA**

Povećana potrošnja goriva, samim time sve veće zagađenje okoliša, zatim zakrčenost cesta koja dovodi do povećanja trajanja putovanja te sve veći broj prometnih nezgoda su razlozi koji su doveli do ideje povezivanja vozila u grupirani niz vozila s naglaskom postojanja neprekidne međusobne komunikacije. U brojnim istraženim izvorima navedeni se koncept pronalazi pod nazivom „Platooning“ koji će se kao takav koristiti u daljnjoj razradi teme. Za povezivanje, bežičnu komunikaciju i razmjenu podataka te funkcioniranje vozila potrebna je primjena inovativne tehnologije. Osim što primjena *Platooning* koncepta u promet može otkloniti već navedene nedostatke, također je u mogućnosti olakšati transport robe, reducirati vrijeme putovanja tokom vršnih razdoblja te povećati sigurnost na prometnicama. Zahvaljujući bežičnoj komunikaciji, vozila u *Platoonu* se kreću na međusobno manjim udaljenostima nego što je to inače u prometu, a upravo takva vožnja dovodi do smanjenja potrošnje goriva kao najistaknutije prednosti *Platooning* koncepta. Ušteda energije naposljetku dovodi do manjeg zagađenja okoliša koje je u današnje vrijeme velik problem, no treba napomenuti da sve navedeno na kraju rezultira smanjenjem troškova.

### **2.1. PREDUVJETI ZA AUTOMATIZIRANO GRUPIRANJE I KRETANJE VOZILA**

Prema Janssensu [1], *Platooning* je niz od dva ili više vozila koja putuju zajedno i elektronički su povezana putem bežične komunikacije, drugim riječima grupirani niz bežično povezanih vozila. Postoji jedno vodeće vozilo (engl. Lead Vehicle – LV) i jedno ili više pratećih vozila (engl. Following Vehicle – FV). Uz smanjenu potrošnju goriva, veću sigurnost na prometnicama, manje troškove transporta i sl., prvobitna svrha *Platooning* koncepta je automatizacija vozila. Govoreći o razini automatizacije vozila treba napomenuti da postoji 6 stupnjeva kao što je prikazano u Tablici 1 ispod teksta.

**Tablica 1. Razine automatizacije**

<b>Razina automatizacije</b>	<b>Opis razina automatizacije vozila</b>
Razina 0	Izostanak bilo kakve automatizacije vozila.
Razina 1	Najniža razina automatizacije upravljanjem vozila gdje vozilo tek pomaže vozaču u upravljanju, primjerice adaptivni sustav za kontrolu vožnje – ACC.
Razina 2	Djelomična automatizacija vožnje; sustav vozila je sposoban istodobno i upravljati vozilom i usporavati/ubrzavati kako bi se zadržao sigurnosni razmak u odnosu na vozilo ispred.
Razina 3	Uvjetna automatizacija, vozilo je u stanju pored svega iz razine 2 preuzeti kontrolu i preteći te zaobići vozilo koje se kreće usporeno.
Razina 4	Visoka razina automatiziranosti, početak prave autonomije vozila, svi sustavi vozila mogu prepoznati stanje u prometu i okolini, samostalno voziti te intervenirati ukoliko situacija to zahtijeva (npr. iznenadni prelazak pješaka preko ceste).
Razina 5	Potpuna automatizacija vožnje gdje je vozilo sposobno posve samo obavljati sve funkcije u vožnji bez ikakvog sudjelovanja vozača, takvo vozilo nema potrebe ni za vozačem niti ima pričuvne ručne kontrole, dok sve druge razine automatizacije imaju.

Izvor: Prilagodio autor sukladno [2]

Stupnjevi automatizacije prikazani u Tablici 1 definirani su od strane SAE – Society of Automotive Engineers [2]. U navedenoj tablici opisane su funkcije koje automatizirani sustav vozila treba preuzeti od vozača da bi autonomno upravljao vožnjom. Na taj način, vozilo je u mogućnosti detektirati i klasificirati objekte u svojem okruženju kao što su stacionarni i/ili mobilni objekti na prometnici i/ili pored prometnice. Razine automatizacije opisane u tablici kreću od nule, točnije nulta razina su vozila koja nisu „svjesna“ okoline već samo reagiraju na jednostavne ulaze automobilskih senzora. Vožnja je u ovoj razini pod kontrolom vozača, a kočenje u slučaju nužde spada u ovu razinu jer ne upravlja aktivno vozilom. Značajke navedene razine ograničene su na davanje upozorenja i trenutnu pomoć, a neke od njih su: automatsko kočenje u nuždi, upozorenje na mrtvi kut, upozorenje o napuštanju trake itd. Razina 1 je najniža razina automatizacije, u čijem slučaju je vozilo sposobno održavati sigurnosni razmak od vozila ispred, no vozač upravlja vozilom i nadzire okolinu. Ova razina automatizacije pruža vozaču podršku pri upravljanju ili kočenju odnosno ubrzanju, a značajke ove razine su centriranje trake ili adaptivni sustav za kontrolu vožnje – ACC, ali ne i oboje odjednom. Djelomična automatizacija vožnje, tj. razina 2, vozaču pruža podršku pri upravljanju i kočenju odnosno ubrzanju, no treba naglasiti da i u

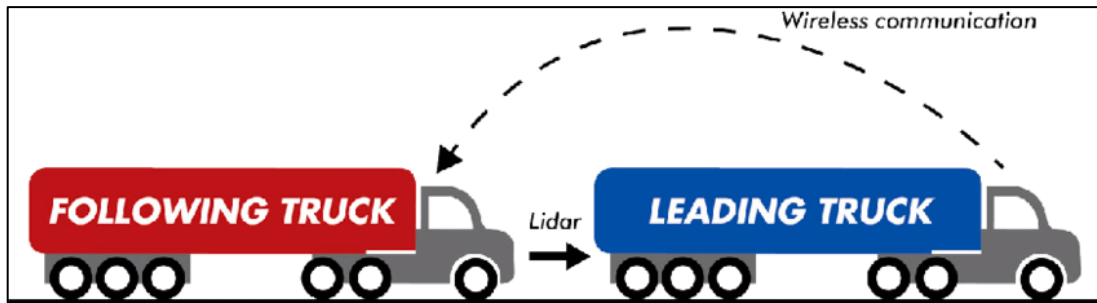
ovoj razini automatizacije vozač u svakom trenutku može preuzeti kontrolu nad vozilom. Značajke navedene razine su iste kao u prethodnoj, no u ovom slučaju je mogućnost rada značajki istodobna. Bez obzira jesu li navedene značajke 0,1 i 2 uključene, vozač mora nadzirati vožnju, čak i ako ne upravlja pedalama. U svrhu percepcije okoline, vozilo mora biti opremljeno raznim proprioceptivnim i eksterioceptivnim sensorima. Najznačajniji eksterioceptivni senzori u domeni autonomne vožnje su: RGB kamera, Stereo kamera, LiDAR, radar te ultrazvučni senzori, dok su najznačajniji proprioceptivni senzori: GNSS/IMU i odometar. Za razinu 3, tj. uvjetnu automatizaciju, može se reći da su sustavi u vozilu „svjesni“ okoline u kojoj se vozilo nalazi. Iako se radi o složenijem sustavu, za vozača je iskustvo slično kao kod prethodne, djelomične automatizacije. Govoreći o složenijem sustavu, treba napomenuti da uz sve karakteristike razine 2, vozilo je u mogućnosti preteći i zaobići vozilo koje se kreće usporeno. Treba naglasiti da autonomni sustav može upravljati vozilom pod ograničenim uvjetima i samo ako su svi ispunjeni, a vozač u bilo kojem trenutku može preuzeti kontrolu nad vozilom. Sljedeće automatizirane razine vožnje neće zahtijevati od vozača da preuzme vožnju. Razina 4 ili visoka razina automatizacije je početak prave autonomije vozila. Sustavi vozila u stanju su raspoznati stanje okoline, samostalno voziti ili reagirati ukoliko situaciju pođe po zlu, također i dalje postoji mogućnost manualnog upravljanja vozilom, no pedale i upravljač mogu, ali i ne moraju biti ugrađeni. Posljednja razina 5 je ustvari puna automatizacije vožnje. U ovoj razini autonomni sustav može upravljati vozilom svugdje i u svim uvjetima. Vozila sa potpunom automatizacijom u stanju su sami prijeći put od točke A do točke B u raznim vremenski uvjetima, danju i noću, neovisno o stanju na prometnicama.

Postoji protokol za grupiranje *Platoona*. Ukoliko vozač odluči grupirati *platoon*, mora slanjem obavijesti najaviti grupiranje *Platoona* u okolini. Uz navedenu obavijest, automatizirani sustav šalje također i informacije o vozilu poput lokacije, brzine, smjera kretanja i dr. Na temelju tih informacija preostala kompetentna vozila na prometnici određuju sposobnost grupiranja *Platoona* te izračunavaju vrijeme čekanja. Vozilo koje je prvobitno poslalo informacije potrebne za grupiranje *Platoona*, kada dođe do istog, postaje vođa *Platoona* odnosno LV. Bez obzira na već grupirani *Platoon*, vozila međusobno bežično komuniciraju tokom vožnje te dijele informacije neophodne za sve moguće scenarije na prometnici odnosno u okolini koja može utjecati na *platoon*. Vozila uslijed komunikacije, koja je obostrana, prilagođavaju brzinu i položaj, bez uobičajenog odgođenog odgovora, tj. ljudske reakcije karakteristične kod konvencionalnog upravljanja vozila. S obzirom na

bežičnu komunikaciju moguće je jednostavno „uskočiti“ u *platoon* i isto tako ga napustiti tokom vožnje, bez potrebe za zaustavljanjem jednog ili svih vozila. Ukoliko vođa – LV odluči napustiti *platoon*, sljedeće vozilo, ukoliko je u mogućnosti, preuzima njegovu ulogu te vodi ostala FV vozila do početno određenog odredišta.

Ranije spomenuti FV, kontrolira se autonomno dok se LV upravlja ručno. Niz vozila se može sastojati i od teških vozila, npr. kamiona ili autobusa, isto tako i putnička vozila, tj. automobili mogu tvoriti *Platooning*. Kamion ili autobus može biti ili LV, ako je vozač pravilno obučan za vođenje kamionskog niza, ili FV, automatskim upravljanjem, ako je instalirana ispravna oprema. LV predstavlja vođu grupiranog niza, a FV se prilagođavaju promjenama u njegovom kretanju, a da pritom zahtijevaju minimum promjena dinamike kretanja. Bez obzira na automatiziranu vožnju, vozačeva pažnja bi i dalje trebala biti usmjerena na vožnju kako bi bio u mogućnosti u bilo kojem trenutku napustiti niz i samostalno nastaviti vožnju.

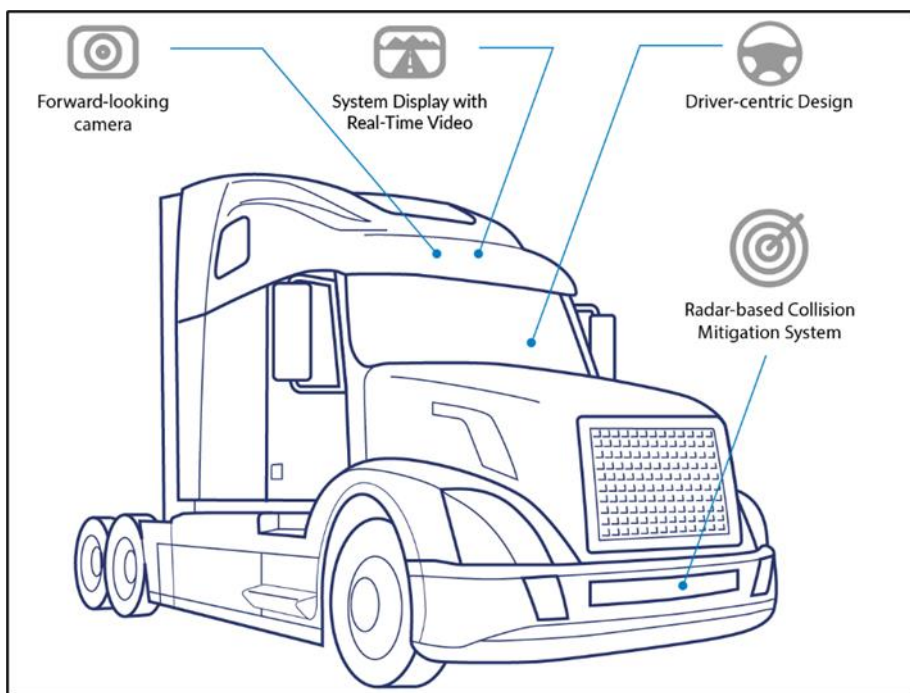
Tehnologija koja se koristi je složena, ali osnovni princip je zapravo vrlo jednostavan. Podaci o kočenju i sensorima bežično se prenose s LV na FV. Zahvaljujući elektronskoj kuki za vuču, Continental [3] predviđa mogućnost početnog smanjenja razmaka između vozila s 50 metara na samo 15 metara pri brzini od 80 km/h. Stručnjaci za razvoj čak predviđaju da će, dugoročno gledano, biti tehnički moguće sigurno smanjiti tu udaljenost na samo 10 metara, što će dodatno smanjiti prostor potreban da bi se *platoon* slobodno kretao prometnicama. Predočiti *platoon* od dva vozila je puno jednostavnije što je i vidljivo na Slici 1, na kojoj je prikazan *platoon* od dva kamiona, put bežične komunikacije od LV do FV te LiDAR uređaj. Unatoč tome što je temeljni mehanizam LiDAR-a sičan radaru, LiDAR koristi nevidljiva laserska svjetla umjesto radio valova. Njegovi sustavi omogućuju autonomnim vozilima otkrivanje prepreka ili drugih vozila, može se reći da je jedan od preduvjeta za ostvarivanje *platooninga* [4]. Navedeni parametri u domeni prometnog toka i prometnog inženjerstva se nazivaju interval slijeđenja (engl. Headway), odnosno razmak slijeđenja (engl. Spacing). Interval slijeđenja u prometnom toku predstavlja vrijeme između prolaska dva vozila kroz zamišljeni presjek promatranog dijela puta te se izražava u sekundama. S druge strane, razmak slijeđenja predstavlja prostorni razmak između dva vozila u prometnom toku, a izražava se u metrima. Ukoliko je jedinica mjere u sekundama, kao što je interval slijeđenja, ona je proporcionalna s brzinom kretanja što znači da ukoliko je brzina kretanja veća proporcionalno će biti veća i udaljenosti i obrnuto.



**Slika 1. Prikaz *Platoona* koji se sastoji od dva kamiona, puta bežične mreže i LiDAR uređaja**

Izvor: [5]

Osim komunikacija između vozila (engl. Vehicle-to-Vehicle – V2V) i vozila s infrastrukturom (engl. Vehicle-to-Infrastructure – V2I), potrebni su još neki preduvjeti da bi se ostvario *Platoon*, a neki od njih su RGB kamere, radar senzor i LiDAR uređaj, prikazani na slici 2. Kamera je najstariji tip uređaja za prikupljanje podataka o okolini koji se koristi u vozilima, ujedno i najintuitivniji senzor jer funkcionira poput ljudskih očiju, a osim toga kamera je jedini 2D senzor, što ju čini ključnom za detekciju prometnih traka i oznakama na kolnicima. Radar ili radio detekcija i domet, se koristi za precizno praćenje položaja, brzine i smjera kretanja, a njegova tehnologija se može podijeliti na odašiljač, koji emitira radio valove u ciljanom smjeru, i prijemnik. Ipak, radar ne može razlikovati bicikl od motocikla, za razliku od kamere [6]. Već spomenuti LiDAR napredna je verzija radara no, koliko god napredne i sofisticirane tehnologije senzora postale, one nisu ništa više od računala, a povezana računala uvijek su u opasnosti od kibernetičkih napada. Stoga, ukoliko navedeni senzori preuzmu upravljanje vozilima, potrebne su mjere zaštite i sigurnosti u svrhu osiguranja od zlonamjernih aktera.

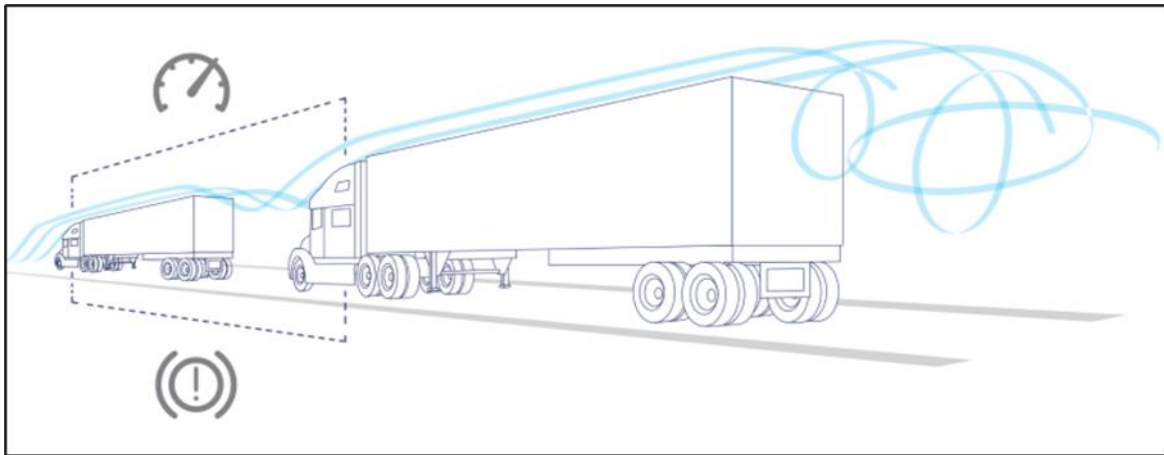


**Slika 2. RGB kamere, radar i LiDAR uređaj na vozilu, u ovom slučaju kao jedni od preduvjeta za ostvarivanje *Platoona***

Izvor: [7]

Kao što je prikazano na slici 3, smanjeni aerodinamički otpor posljedica je smanjene udaljenosti među vozilima što na kraju dovodi do najznačajnije prednosti *platooning* koncepta, točnije uštede energije. Unatoč spoznaji da je aerodinamički otpor proporcionalan kvadratu brzine vozila, *platooning* je efikasniji u aspektu uštede energije pri većim brzinama. Testiranje ekonomičnosti goriva od strane Sjevernoameričkog vijeća za učinkovitost prijevoza (NACFE) i američkog Ministarstva energetike i prometa pokazalo je uštedu goriva, točnije FV troši do 15% manje goriva, a čak i kod LV postoji ušteda goriva do 5%. Jedan *platoon* smanjio bi godišnje troškove goriva za više od 9000 eura, no prije svega uzrokovao smanjenje emisije CO<sub>2</sub> za 24 kg/h. U većini istražene literature, osnovno pitanje koje se postavlja je koji su efekti povezivanja više vozila, tj. veći broj *Platoona* na prometnicama [3]. Kao što je već spomenuto koncept *Platooninga* u prometu smanjuje emisije stakleničkih plinova, a samim time povećava se kvaliteta zraka. Prema izvorima, navedeni koncept je u mogućnosti potencijalno smanjiti emisiju CO<sub>2</sub> za čak 10%. Izuzev samog vozila, dizajn prikolice, alternativna goriva, logistika, infrastruktura i ITS tehnologija igraju odlučujuću ulogu u smanjenju emisije CO<sub>2</sub>. Automatska kontrola brzine i kooperativno upravljanje vozilom osim što štedi energiju istovremeno smanjuje emisije CO<sub>2</sub> i ostalih zagađivača [8].





**Slika 3. Smanjeni aerodinamički otpor između dva kamiona kao posljedica smanjene udaljenosti između vozila u *Platoonu***

Izvor: [7]

Na društvenoj razini, sigurnost vožnje se povećava jer 90% svih nesreća su uzrokovane ljudskim greškama koje je tako reći *platooning* koncept u mogućnosti spriječiti. Uz vožnju povezanu bežičnom komunikacijom, kočenje je automatsko s gotovo nultim vremenom reakcije u usporedbi s ljudskim kočenjem. *Platooning* može znatno doprinijeti smanjenju zastoja u prometu, a samim time znatno skratiti putovanja na posao tijekom vršnih razdoblja. Smanjenjem gužvi i kašnjenja u vremenu putovanja omogućena je i prednost optimizacije vremena vožnje. Govoreći o bržem putovanju u *Platoonu*, dolazi se do bržeg dopremanja robe. U ovom slučaju prednost *platooninga* je u višestruko transportiranom teretu od strane transportne tvrtke do određenog cilja [8].

Istraživanjem literature za navedeni koncept utvrđeno je osim mnogih prednosti i nekoliko nedostataka. Sve dok veći broj tvrtki ne prihvati i integrira tehnologiju potrebnu za ostvarivanje *Platoona*, postojat će ograničena raspoloživost za *platooning*. Upravo iz navedenog razloga postoji mogućnost ograničavanja *Platoona* na samo određenim prometnicama. Neke tvrtke možda neće htjeti voziti s vozilima druge tvrtke i trebat će vremena da se sklope sporazumi. *Platooning* uvelike ovisi o autonomnoj tehnologiji, koja je još uvijek u fazi testiranja. Nažalost i dalje postoji mnoštvo nejasnoća i zagonetki vezanih uz posljedice prometne nesreće ili nekog drugog scenarija u prometu tokom izvođenja *platooning* koncepta. Nakon prihvaćanja tehnologije navedenog koncepta slijedi uvođenje iste koja sa sobom donosi ogromne troškove. U ovoj fazi postoji mogućnost odustajanja brojnih tvrtki. Visoku tehnologiju potrebno je naknadno ugraditi u vozila, što iziskuje ogromne troškove i automatski povećava cijenu samog vozila. Treba napomenuti da postoji velika mogućnost, a samim time i opasnost od kibernetičkih napada, tzv. hakiranja sustava

tokom kretanja vozila u *Platoonu*. Takva situacija dovodi u opasnost, ne samo vozila i vozače u nizu, nego i sva ostala vozila i ljudske živote u prometu. Rješenje ovog nedostatka je vrlo teško, gotovo nemoguće. Ovaj nedostatak, bolje rečeno problem, bi svakako trebao biti prioritet stručnjacima za rješavanje informatičkih problema. *Platoon*, ukoliko se sastoji od kamiona bio bi prevelike dužine te stvarao probleme kod isključivanja i uključivanja na autocestu, točnije postoji mogućnost stvaranja velikih zastoja na ulaznim ili izlaznim rampama na prometnicama [9].

## **2.2. SUSTAVI ZA KONTROLU VOŽNJE**

### **2.2.1. Osnovni sustav za kontrolu vožnje**

Sustav za kontrolu vožnje (engl. Cruise Control – CC) je značajka koja preuzima kontrolu nad brzinom vozila koju inače kontrolira vozač. CC je inteligentan sustav koji regulira rad motora vozila kako bi se vozilo kretalo zadanom brzinom bez potrebe za intervencijom vozača [10]. Koristan je kod primjerice umora vozača koji bi tijekom vožnje na duge udaljenosti mogao nastupiti. Sustav oponaša način vožnje vozača, no umjesto vozačevog pritiska na papučicu gasa, aktuator kontrolira gas papučicu, a vozilo nastavlja vožnju konstantnom brzinom. Deaktiviranje CC sustava postiže se jednostavnim pritiskom na papučicu kočnice, nakon čega je upravljanje vožnje ponovno vozačeva potpuna kontrola. Vozači mogu upravljati CC sustavom izravno s upravljača, a tipke se nalaze u blizini upravljača.

CC sustav postoji već duže vrijeme, točnije Ralph Teetor, inženjer strojarstva, došao je na ideju izuma navedenog sustava motiviran frustracijom navike svojeg osobnog vozača da vodi razgovore dok u isto vrijeme upravlja vozilom. Tehnologija je doživjela mnoga napredovanja i poboljšanja od tada, koja su je učinila sigurnijom i pouzdanijom. Da bi CC funkcionirao potrebno je zadovoljiti nekoliko preduvjeta, a jedan od važnijih je aktuator. Na temelju brzine definirane od strane vozača i trenutne brzine vozila, razinu okretaja koju aktuator proizvodi, kontrolira elektronička upravljačka jedinica (engl. electronic control unit – ECU). Taj upravljački sustav konstanto prati brzinu vozila pa čak i najmanje promjene vanjskih izvora, te u skladu s time prilagođava položaj uređaja koji kontrolira protok goriva ili snage u motoru. ECU kontrolira gas pomoću motora kako za normalno ubrzanje gasa tako i za CC.

Vožnja CC sustavom pruža pomoć vozaču da se usredotoči na upravljanje te sprječava prebrzu vožnju. Takav način vožnje povećava uštedu goriva i smanjuje trošenje motora

vozila. Uporaba CC-a i postavljanje na razumnu brzinu smanjiti će potrošnju goriva na način da sprječava nagla ubrzanja i usporavanja. Navedeni sustav, bez obzira na mnoge prednosti, vrlo je rizičan ukoliko se primjenjuje u nekonvencionalnim uvjetima. Neki od tih uvjeta su snijeg, vrlo jaki pljuskovi, zaleđena cesta, no čak i cesta s brojnim te oštrim horizontalnim krivinama. U situacijama poput naglog skretanja ili pojavljivanja vozila u neposrednoj blizini, uz aktiviran CC sustav, vozač neće biti u mogućnosti reagirati dovoljno brzo, tj. usporiti vozilo, skrenuti ili se zaustaviti. Još jedan od nedostataka je vozačeva pažnja, koja bi trebala biti potpuno posvećena vožnji i upravljanju vozilom, bez obzira što CC sustav upravlja brzinom vozila. Korištenje CC sustava prikladan je i izvanredan način za kontrolu brzine tijekom dugih vožnji na autocestama, gdje je uglavnom ista brzina kretanja vozila. Treba imati na umu da se sustav za kontrolu vožnje ne bi trebao koristiti ukoliko vozač nije u stanju pridati potpunu pažnju vožnji (umor i sl.). Vozači smatraju da prednost opuštanja noge tijekom vožnje znači i ne toliku pažnju u vožnji, no to povećava distrakcije od vožnje (poput poziva i poruka na pametnim telefonima) [11]. No, s obzirom da svaka pojedinačna vožnja se odvija na svoj jedinstven način, ne može se primijeniti opća izjava na CC i njegovo mnoštvo prednosti i potencijalne nedostatke.

### **2.2.2. Adaptivni sustav za kontrolu vožnje**

Adaptivni sustav za kontrolu vožnje (engl. Adaptive Cruise Control – ACC) je napredna inačica CC sustava. Ovaj sustav kombinacija je CC sustava i sposobnosti za izbjegavanje prometnih nesreća, a dva su načina rada od kojih je jedan način kretanja vozila (engl. Cruise mode), a drugi je način slijeđenja (engl. Following mode) [12]. CC sustav konstanto održava brzinu koju je vozač postavio, već spomenuti interval slijeđenja, dok ACC automatski prilagođava brzinu vozila tako da ona odgovara brzini vozila ispred. Drugim riječima ukoliko vozilo ispred uspori, ACC automatski usklađuje brzinu koristeći se podacima radarskih senzora. Ovaj sustav idealan je za stani-kreni vožnju, točnije vožnju pri 60 km/h do zastoja, što se najčešće događa tokom jutarnjih sati kada većina ljudi ide na posao te kasnih popodnevni sati kada većina ljudi ide svojim kućama.

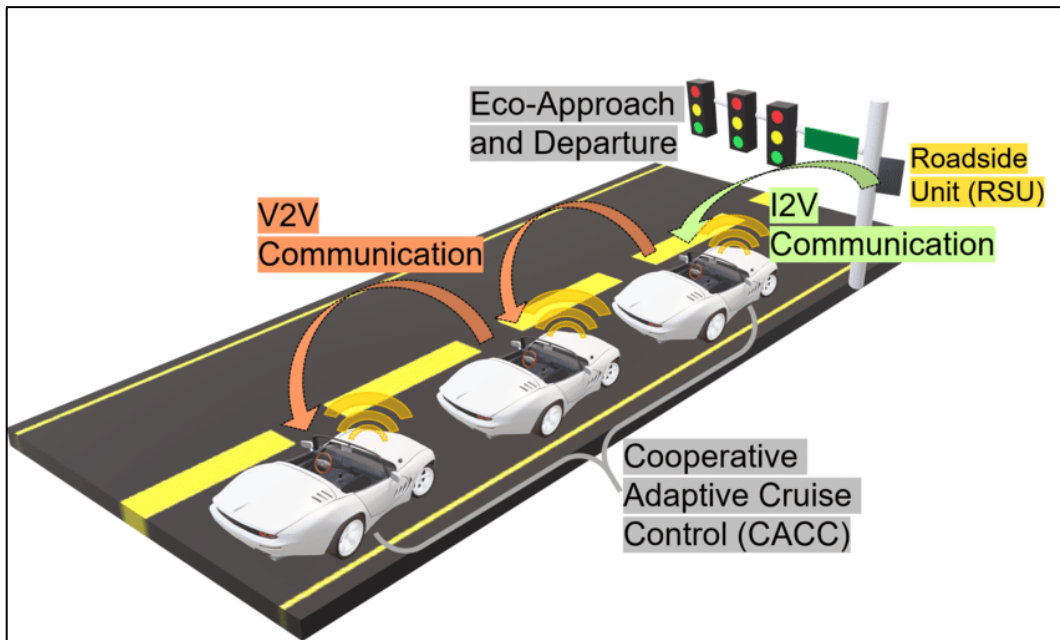
Najvažnija prednost ACC sustava je kontrola brzine vozila, naravno bez potrebe za vozačevim upravljanjem. S obzirom na kontrolu brzine vozila od strane ACC sustava, mogućnosti brze vožnje su manje nego inače, a samim time ne dolazi do kršenja zakona što umanjuje na kraju i mogućnost prometne nesreće. Osim prednosti kontrole brzine, ACC kontrolira količinu potrošnje goriva koja varira s obzirom na razinu ubrzanja odnosno usporavanja. Stoga, ACC pomaže poboljšati razinu potrošnje goriva, a samim time uštedjeti

troškove. Istraživanja su pokazala da bi postavljanje ACC sustava, na primjerice 90 km/h, poboljšalo učinkovitost goriva u prosjeku za oko 17% [13]. Također treba nadodati da je veća udobnost tokom korištenja ACC-a jedna od prednosti sustava. Nedostatak, bolje rečeno jedna od situacija kada se ne bi trebao koristiti ACC sustav su loši vremenski uvjeti. Nepogodni vremenski uvjeti, poput kiše, snijega ili zaleđene ceste, nisu prikladni čak ni za aktivaciju, a samim time ni vožnju s uključenim ACC sustavom te također potencijalno dovode do prometne nesreće.

### **2.2.3. Kooperativno adaptivni sustav za kontrolu vožnje**

Nedavni napredak u ostvarivanju komunikacije između vozila omogućuje daljnje poboljšanje ACC sustava. Navedeno se postiže V2V, izravnom komunikacijom i razmjenom informacija s jednim ili više prethodnih vozila, s ciljem održavanja unaprijed definirane udaljenosti između vozila. Takav se sustav naziva kooperativni adaptivni sustav za kontrolu vožnje (engl. Cooperative Adaptive Cruise Control – CACC) [11]. *Platooning* se oslanja na strategiju upravljanja konstantnim razmakom udaljenosti (engl. Constant Distance Gap Control Strategy – CDG), a CACC sustav se na strategiju upravljanja konstantnim vremenskim razmakom (engl. Constant Time Gap Control Strategy – CTG), gdje je udaljenost između vozila proporcionalna brzini.

Sama riječ kooperativan objašnjava interakciju i komunikaciju više objekata u isto vrijeme. Za razliku od ACC sustava, kod CACC sustava veći broj vozila međusobno komunicira, a da bi ta vozila komunicirala, CACC sustavu potrebni su kooperativni elementi; V2V i V2I komunikacijske tehnologije. Osim navedenih komunikacijskih tehnologija, potrebna je i jedinica uz cestu, točnije RSU (engl. Road Side Unit – RSU) koja služi kao izvor informacija za inteligentna vozila, drugim riječima za realizaciju CACC sustava, kao što je prikazano na slici 4 [14].

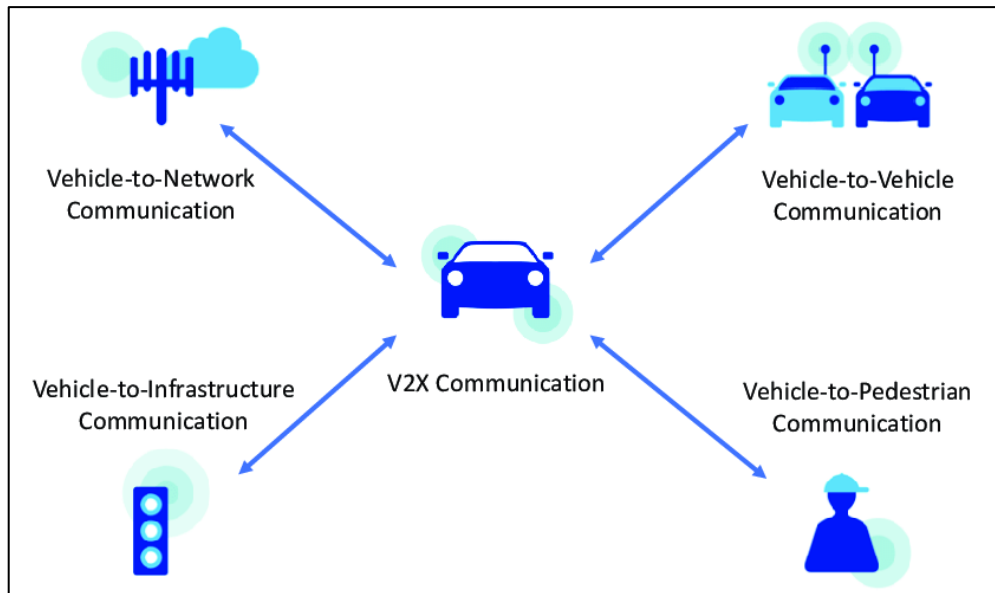


**Slika 4. Potrebni preduvjeti za ostvarivanje u prometu: V2V komunikacijska tehnologija, V2I komunikacijska tehnologija te RSU**

Izvor: [12]

### 2.3. KOMUNIKACIJSKE TEHNOLOGIJE ZA POVEZIVANJE VOZILA

Komunikacijske tehnologije vozila jedan su od preduvjeta ostvarivanja naprednih koncepata *platooninga* i kooperativne vožnje. Omogućuju vozilima razmjenu podatka i informacija u prometu, koje je inače nemoguće dohvatiti samo sensorima na vozilu [15]. Temeljni cilj *platooning* koncepta je omogućiti sljedećim vozilima – FV da vožnju ostvaruju bez vozača, slijedeći vodeće vozilo, tj. LV, drugim riječima dva vozila, jedan vozač. Po završetku prihvaćanja, uvođenja i primjene *platooning* koncepta, potrebni su mnogi preduvjeti da bi *Platoon* bio prije svega moguć i siguran, a kasnije produktivan i koristan. Ne bi li se ostvarili osnovni principi funkcionalnosti spomenutog koncepta, obavezno je postojanje naprednih komunikacijskih tehnologija. Sustav bežičnih komunikacija među vozilima se brzo razvija, a radi širokog raspona dijelimo ga na nekoliko komunikacijskih tehnologija kao što je prikazano na slici 5. U domeni komunikacijske tehnologije koja se primjenjuje kod kretanja vozila, najopširnija je komunikacijska tehnologija na relaciji Vozilo-Sve (engl. Vehicle-to-Everything – V2X) koja obuhvaća cijeli sustav jer označava komunikaciju vozila sa svime. Najčešći oblici komunikacije u prometu su na relaciji Vozilo-Vozilo (engl. Vehicle-to-Vehicle – V2V) te Vozilo-Infrastruktura (engl. Vehicle-to-Infrastructure – V2I). Još jedna značajna tehnologija komunikacije, točnije Vozilo-Pješak (engl. Vehicle-to-Pedestrian – V2P) se također primjenjuje kod kretanja vozila, no glede značaja za obradu područja istraživanja, neće biti obuhvaćena [16].

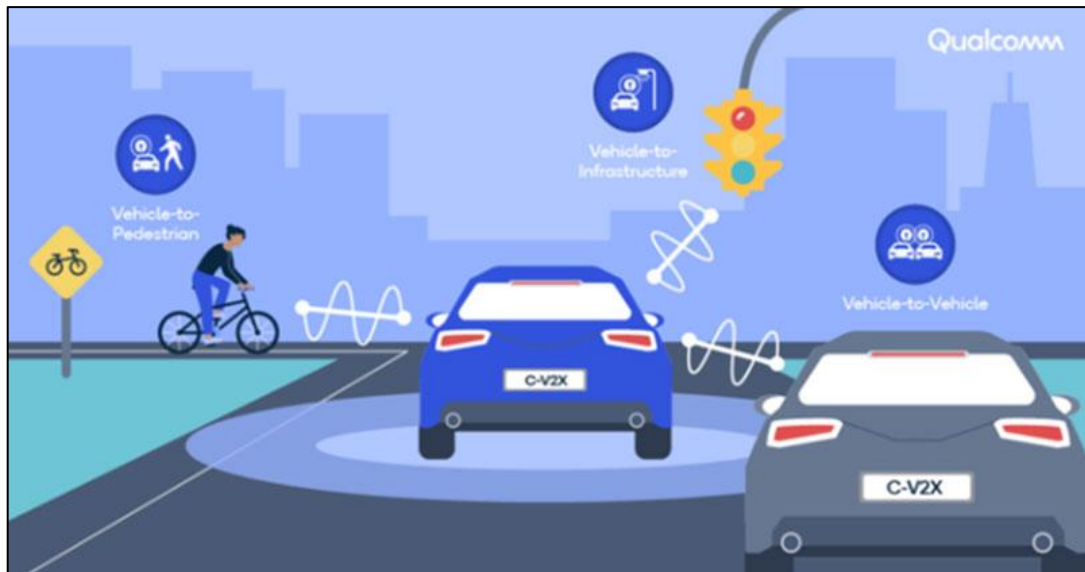


**Slika 5. Podjela sustava bežičnih komunikacija među vozilima**

Izvor: [17]

### **2.3.1. Komunikacijska tehnologija na razini vozilo-sve (V2X)**

V2X je komunikacijski sustav koji podržava prijenos informacija od strane vozila prema pokretnim dijelovima prometnog sustava koji potencijalno utječu na vozilo. Glavna svrha V2X tehnologije je povećanje sigurnosti na prometnicama, ušteda energije; smanjena potrošnja goriva i prometna učinkovitost na prometnicama. Zahvaljujući V2X sustavu, vozilo ima mogućnost komunikacije sa svime što ga okružuje, odnosno svim učesnicima u prometu omogućen je pristup informacijama dohvaćenim iz „oblaka“ kao što je prikazano na slici 6. Informacija poput realnih izvješća o trenutnom stanju na cestama, podaci učitani od strane senzora, te podaci mapiranja visoke razlučivosti. Nacionalna uprava za sigurnost u cestovnom prometu (NHTSA) procjenjuje smanjenje prometnih nesreća za 13% ukoliko se integrira V2X komunikacijski sustav u promet [18].



**Slika 6. Mogućnosti komunikacije vozila sa svime što ga okružuje zahvaljujući V2X komunikacijskoj tehnologiji**

Izvor: [19]

Postoje dva načina komunikacije V2X tehnologije, a jedan od njih je IEEE 802.11p, međutim u različitim državama moguće je navedenu tehnologiju pronaći pod drugim nazivom te drugačijim sadržajem. U SAD-u se naziva Namjenska komunikacija kratkog dometa (engl. Dedicated Short Range Communication – DSRC), u Europi se zove ITS-G5, a naposljetku, Japan ima vlastiti standard ARIB STD-T109. Postoji evolucija IEEE 802.11p, dostupna od 2021.godine, naziva IEEE 802.11bd koji bi trebao otkloniti ograničenja načina rada prijašnjeg standarda [20]. Drugi tip V2X komunikacijske tehnologije je Cellular V2X (C-V2X), koji predstavlja alternativu 802.11p, a koristi bežičnu širokopojasnu tehnologiju (engl. Long Term Evolution – LTE) kao temeljnu tehnologiju. LTE-V2X je napredna informacijska i komunikacijska tehnologija koja se primjenjuje u cestovnim prometnim sustavima, s ciljem omogućavanja razmjene informacija između vozila, ljudi, infrastrukture i mreže [21].

Parametri komunikacije V2X uglavnom utječu na pouzdanost i performanse razmjene podataka u grupiranim nizovima vozila. Dokazano je da istovremeni način rada uspijeva smanjiti latenciju, tj. vrijeme čekanja da podaci stignu od trenutka kada su zatraženi, što omogućuje *Platoon* sa većim brojem vozila na prometnicama u budućnosti [22]. Najvažnije prednosti V2X sustava uključuju povećanu sigurnost na cestama, uštedu goriva, učinkovitost prometa i bolje upravljanje cestama, što je niže navedeno i opisano. No, temeljna prednost ove komunikacijske tehnologije, kao i svih drugih, jest brzo dijeljenje svih informacija o

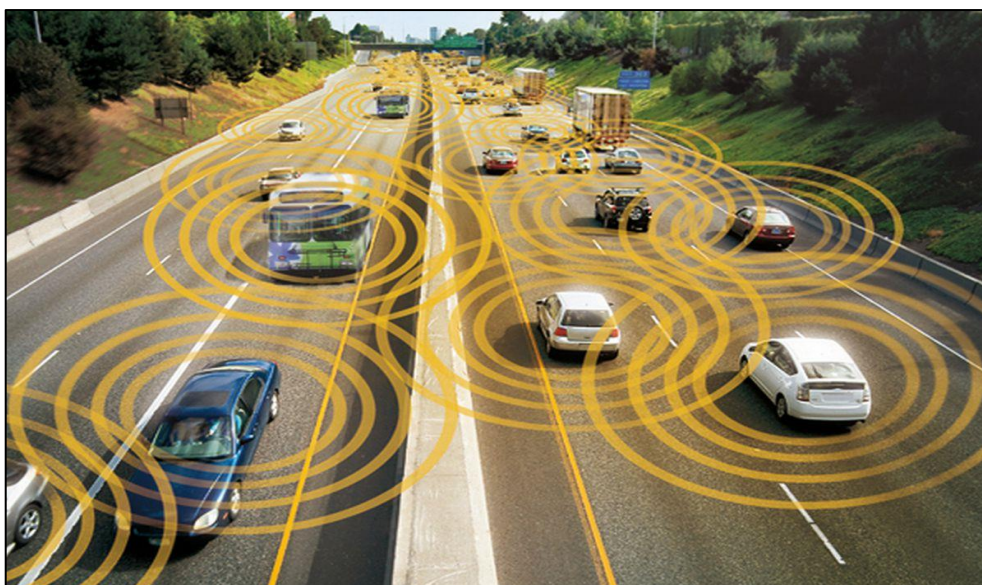
okolini u prometu te primjena istih u funkciji pomoći vozaču pri donošenju ispravnih odluka. V2X pruža vozačima korištenje funkcija za upravljanje vozilom sa svrhom smanjenja operativnih troškova, a i jednostavnosti korištenja. Uz to vozač dobiva informacije o stanju vozila, kao i podsjetnike i predloške za servis vozila, a pored već svih navedenih također dobiva informaciju zahvaljujući kojoj neće doći do kvara u vozilu, a samim time i mogućih visokih troškova. Razne sigurnosne funkcije upozoravaju vozače na vanjske, ali i unutarnje opasnosti vozila. Na taj način, vozači mogu voziti u inače otežanim uvjetima, poput slabe vidljivosti na cesti [23]. S obzirom da su vozila spojena na internet, umrežena s ostalim vozilima, infrastrukturom pa čak i pješacima, podložna su kibernetičkim napadima, tj. hakiranju sustava. Osobe koje izvode takve napade nazivaju se hakerima, a svojim vještinama pristupaju vozilu i kontrolama nad vozilom što dovodi vozača, suvozače i ostale sudionike u prometu, u životnu opasnost. Nedostatak privatnosti nadovezuje se na prethodno naveden nedostatak; napada na sustav i njegovu sigurnost. Također kvar V2X sustava može prouzročiti kobne posljedice na autonomno upravljanje vozilom. Neispravan rad vozila, senzora ili mreža može dovesti do netočno dohvaćenih podataka i informacija za vozača, dovodeći do neispravne komunikacije, a takve komunikacije mogu uzrokovati prometne nesreće koje dovode ljudski životi u opasnost.

Iako je tržište V2X tehnologije još uvijek u fazi razvoja, većina proizvođača počela je ugrađivati tehnologiju, a vozila se sve više povezuju s drugim vozilima i infrastrukturom u njihovoj neposrednoj blizini. Vozila postaju „inteligentna“, a opremljena su sustavima koji zahtijevaju manje ljudskog angažmana. Kao rezultat toga, korisnici imaju koristi od sigurnijih, zelenijih putovanja sa manjim utjecajem na okoliš, zahvaljujući adaptivnom sustavu za kontrolu vožnje i sensorima. Međutim, za realizaciju svih prednosti V2X sustava trebat će vrijeme, jer da bi vozilo moglo komunicirati s bilo kojim entitetom, svaki taj entitet isto tako mora biti opremljen V2X tehnologijom. Zajedno, V2X komunikacijske tehnologije čine dio onoga što se opisuje kao Kooperativni inteligentni transportni sustav (engl. Cooperative – Intelligent Transport System – C-ITS). Dok se ITS usredotočuje na digitalne tehnologije postavljene uz cestu ili u vozila, C-ITS se usredotočuje na komunikaciju između ta dva sustava, bilo da vozilo komunicira s drugim vozilom, infrastrukturom ili drugim C-ITS sustavom [24].



### 2.3.2. Komunikacijska tehnologija na razini vozilo-vozilo (V2V)

V2V komunikacija predstavlja bežičnu razmjenu informacija i podataka između dva ili više vozila kao što se vidi na Slici 7. Ova tehnologija omogućuje vozilima bežičnu razmjenu informacija o brzini, lokaciji i smjeru kretanja [25]. Informacije, točnije prenesene poruke iz jednog vozila u drugo, sadrže trenutni GPS položaj vozila, ubrzanje brzine vozila i promjenu smjera, informacije o kontroli vozila, status kočnice i kut upravljača, kao i povijest puta vozila te predviđanje istog. Kod V2V komunikacijske tehnologije koristi se već spomenuti DSRC, pomoću kojeg se ostvaruje bežična komunikacija na malim ili srednjim udaljenostima te može biti u samo jednom ili u oba smjera. Da bi navedeni standard ispravno funkcionirao pored prometnice moraju biti postavljeni specijalizirani uređaji (engl. Road-Side Unit – RSU) koji zapravo predstavljaju poveznicu između vozila koja se kreću i infrastrukture.



**Slika 7. Prikaz V2V komunikacije u cestovnom prometu, točnije na prometnicama**

Izvor: [26]

Ova tehnologija koristi vizualna, taktilna i zvučna upozorenja, pa čak i kombinaciju svega navedenog, a sve s ciljem upozorenja vozača o okolini odnosno prometnoj situaciji. Spomenuta upozorenja vozačima nude mogućnost da interveniraju kako bi se izbjegla neželjena prometna stanja, poput prometne nesreće. Glavni cilj V2V komunikacije je spriječiti nesreće dopuštajući vozilima u prometu da međusobno šalju podatke o položaju i brzini putem ad hoc mreže (engl. Vehicular Ad Hoc Network – VANET). VANET mreža je bežična mreža decentraliziranog tipa. Ad-hoc mreže mogu biti velikih razmjera što dozvoljava veliki broj korisnika i neograničenu površinu korištenja, što je upravo pogodno

za komunikaciju na relaciji vozila sa svime u prometu. Također omogućuje vozilima povezivanje na internet kako bi dobili informacije o prometu i vremenskoj prognozi u stvarnom vremenu [27]. V2V se temelji na „Peer-to-Peer“ (P2P) mreži koja omogućuje spajanje dvaju ili više računalnih sustava te međusobno dijeljenje resursa. U P2P mreži svaki se uređaj smatra ravnopravnim, a resursi se mogu dijeliti s drugim umreženim računalima. Dakle svaki element mreže, u ovom slučaju svako vozilo, može kreirati, primiti i prosljeđivati poruke [16].

Da bi komunikacijski sustav V2V funkcionirao i potpuni rad sustava bio omogućen, potrebne su komponente smještene u vozilima i duž kolnika. Pasivne komponente, točnije Radio-frekvencijske (RF) komponente poput antene koja je najosnovnija i komponente Elektromagnetske kompatibilnosti (EMC) [28]. Tokom automatizirane vožnje, vozila bi uvijek trebala biti u mogućnosti precizno i pouzdano detektirati objekte u svojoj okolini te na odgovarajući način reagirati. Prednji radarski senzor olakšava upravo navedeno brzo i precizno otkrivanje, a zatim i praćenje objekata, u ovom slučaju vozila, a sve to zahvaljujući dugom dometu detekcije, širokom vidnom polju i izvanrednoj odvojitosti kuta [29].

Direktna komunikacija između samih vozila pruža veću sigurnost vozačima u vožnji, a neke od prednosti pružanja navedene sigurnosti opisane su u nadolazećem tekstu. Sprječavanje nastanka prometnih nesreća je najbitnija prednost i svrha V2V komunikacijske tehnologije. Znatno broje prometnih nesreća uzrokovan je ljudskom pogreškom, a V2V može pomoći u stvarnom vremenu upozoravajući vozače na neposredne opasnosti u prometu. Također postoji mogućnost ublažavanja prometnih zastoja i smanjenja vremena putovanja integriranjem komunikacijske tehnologije. Grupiranim nizom vozila opremljenim komunikacijskom tehnologijom V2V, postiže se smanjeni otpor zraka, a smanjenim otporom zraka šteti se energija, točnije potrošnja goriva je smanjena. Mnoga istraživanja pokazala su čak dvoznamenkaste postotke uštede goriva, FV čak 10% – 15%, a LV 3% – 5% [30]. V2V komunikacijska tehnologija osim što olakšava i osigurava vožnju, isto tako prikuplja podatke gdje vozač ide i kada ide, drugim riječima sve navike pojedinog vozača u vožnji. Prvobitno su to prednosti, no kada se radi o podacima gdje se netko nalazi i kada te kako bi, onaj tko ima pristup podacima to mogao iskoristiti, prelazi u nedostatak. Odgovornost u složenim situacijama se također dovodi u pitanje te je za sada veliki problem, a samim time i nedostatak. Primjerice, V2V tehnologija signalizira vozaču prohodnost ceste ispred vozila, međutim iznenadno nailazi drugo vozilo, ali vozač nije u mogućnosti na vrijeme zaustaviti se te dolazi do prometne nesreće, nakon koje nailazi pitanje tko je kriv, vozač ili neispravna

komunikacijska tehnologija. Nedostatak sigurnosti podataka ili kibernetički napadi predstavljaju opasnost svim tehnologijama pa tako i V2V komunikacijskoj tehnologiji. Sve veća integracija i upotreba V2V komunikacije u vozilima, pruža sve više prilika hakerima da se „posluže“ podacima o korisniku, tj. vozaču koji posjeduje navedenu vrstu komunikacije u vlastitom vozilu.

V2V komunikacija proširuje i poboljšava trenutno dostupne sustave koji koriste radare i kamere za prijevremenu detekciju neželjenih prometnih stanja, poput prometnih nesreći. Ova tehnologija ne pomaže samo vozačima da se posljedice prometne nezgode svedu na minimum, već da se ona u potpunosti izbjegne. Svrha ove tehnologije je dovesti sigurnost na cestama na višu razinu, pružanjem upozorenja o neželjenim situacijama u prometu prije nego što ih vozač sam uoči.

### **2.3.3. Komunikacijska tehnologija na razini vozilo-infrastruktura (V2I)**

V2I komunikacija podrazumijeva bežičnu razmjenu informacija između vozila i cestovne infrastrukture, a takve informacije omogućuju vozilima prilagodbu odnosno pravovremenu reakciju na prometne situacije. Ova komunikacijska tehnologija omogućena je mrežom sklopovlja, programske podrške i programa i podataka koji su trajno zapisani. Najčešće je bežična i dvosmjerna; informacije s infrastrukturnih uređaja s lakoćom se prenose do vozila putem ad-hoc mreže i suprotno. Slično V2V komunikacijskoj tehnologiji, V2I koristi DSRC kod prijenosa podataka. Uz veliki broj podataka koji se prikupljaju i isto tako dijele, pravovremene informacije mogu se koristiti za omogućavanje širokog raspona prednosti u pogledu sigurnosti, mobilnosti i okoliša [31]. V2I zapaža i upisuje podatke poput prometnih zastoja, vremenske prognoze, razine prohodnosti mostova, status signalnih uređaja itd., a potom ih bežično prenosi kako bi vozači bili obaviješteni o uvjetima u prometu. Zahvaljujući pametnim signalima koji šalju informacije o drugim entitetima u prometu, također je i V2V komunikacija uspješnija [32].

V2I komunikacijska tehnologija je također određena DSRC standardom, a sustav komunikacije unutar V2I sustava sadržava OBU (engl. On Board Unit), tj. jedinicu unutar vozila koja nadzire vozilo, pruža podatkovnu i glasovnu komunikaciju te određuje poziciju vozila [33]. Tehnologija se nalazi u svim modernim uređajima uz mogućnost preciznog utvrđivanja pozicije, nakon čega se spajanjem dvije različite adrese izračunava točno trajanje puta vozila. Uslijed prolaska kroz crveno svijetlo ili ne poštivanja prednosti prolaska u raskrižju, infrastruktura šalje informacije ostalim vozilima o opasnosti na cesti. Slanjem

upozorenja i informacija o stanju u prometu, pametna infrastruktura sprječava prometne nesreće, a samim time ulijeva sigurnost i povjerenje vozačima. V2I je ključna za autonomna vozila, jer bez sumnje zna nadolazeće stanje uređaja za signalizaciju prometa, pa vozila hitne pomoći, sigurno prolazeći kroz crvena svjetla, mogu stići brže kako bi spasila živote. Neophodna je i cestovna infrastruktura koja je opremljena komunikacijskim tehnologijama da bi se pravilno iskoristile sve navedene prednosti V2I sustava. Prenose se i dijele informacije o svim stanjima u prometu, no naravno, vozač je i dalje u mogućnosti promijeniti preporučenu brzinu na temelju vremenskih ili nekih drugih uvjeta na cesti.

Uvođenje i opremanje vozila V2I komunikacijskom tehnologije dovodi sa sobom znatne troškove, a kad se uzme u obzir opremanje tehnologijom svakog semafora, parkinga, raskrižja te još velik broj cestovnih infrastruktura kao što se može vidjeti na slici 8, sve skupa dovodi do ogromnih ulaganja, da bi na prvom mjestu V2I komunikacijska tehnologija uopće bila ostvariva. V2I upravlja, bolje rečeno odlučuje sljedeći korak vozača i njegovog vozila. U situacijama poput grešaka sustava, prestanka rada ili kibernetičkog napada, sustav neće obavještavati vozila o opasnostima i promjenama na cestama ili će pak obavijesti biti neispravne. Iz upravo navedenih razloga, vozači će vrlo teško prihvatiti ovakvu vrstu komunikacije i dati povjerenje nečem nestvarnom i virtualnom da upravlja prometom na cesti i ljudskim životima. Slanjem krivih informacija vozilima od strane kibernetičkih napada (hakeri) na sustav, može doći do čak većeg broja i opasnijih prometnih nesreća nego na područjima gdje nije integriran V2I komunikacijski sustav, isto tako prestanak rada sustava predstavlja problem i utječe na sigurnost vozila i vozača. V2I utire put održivijoj, sigurnijoj, učinkovitijoj i autonomnijoj budućnosti vozača, drugim riječima samo je početak razvoja inovativne tehnologije u prometu.



**Slika 8. Mogućnosti povezivanja pojedinih entiteta u prometu zahvaljujući V2I komunikacijskoj tehnologiji**

Izvor: [34]

Da bi vozilu bila omogućena signalizacija namjere pridruživanja, tj. napuštanja *Platoona* u bilo kojem trenutku dok je i dalje aktivan, neizostavan je CACC sustav, kao i V2X koja je skup svih komunikacijskih tehnologija. Navedeni potrebni preduvjeti za ostvarenje *platooninga* zahtijevaju detaljniju razrađenost. Sustavi kooperativne vožnje moguća su i obećavajuća rješenja za prometne situacije, poput situacije na križanju bez uređaja za signalizaciju i regulaciju prometa ili križanju sa lošom preglednošću, koje se još naziva i „slijepo križanje“.

S obzirom na nedostatak modeliranja, kao i nedostižno visoke troškove korištenja prototipova za „što ako?“ studije, simulacija ostaje temeljni instrument za procjenu cjelokupne kooperativne vožnje, točnije za procjene različitih scenarija tokom izvođenja *platooninga* na javnim prometnicama i rješenja istih. Učinkovitost *platooninga* mjeri se u smislu propusnosti, tj. stabilnosti, glatkoće i sigurnosti, pri čemu sigurnosni zahtjevi služe kao kriterij za uspjeh, tj. neuspjeh. Komunikacijske tehnologije V2V i V2I, pomoć su vozilima u donošenju odluka na temelju trenutne prometne situacije, a velik porast broja vozila na prometnicama, prometni zastoji, ogromne potrošnje goriva, a isto tako i količine onečišćenja zraka, razlog su sve češćim prometnim nesrećama. Postoji mogućnost smanjenja navedenih nedostataka na prometnicama pomoću grupiranja niza vozila, što je nadalje u radu prikazano primjerima nekoliko simulacija.

### 3. TESTIRANJE I INTEGRACIJA PLATOONING KONCEPTA U DOMENI CESTOVNOG PROMETA

Prometni tok je istovremeno kretanje više vozila tokom putovanja u određenom poretku [35]. Za analizu prometnih tokova na cestovnim prometnicama neophodno je definirati pokazatelje koji se, u teoriji prometnog toka, nazivaju osnovnim parametrima prometnog toka. Neki od osnovnih parametara prometnog toka su protok vozila ( $q$ ), gustoća prometnog toka ( $g$ ), brzina prometnog toka ( $v$ ), vrijeme putovanja vozila u toku ( $t$ ) i ostali. S obzirom na način promatranja pojedinog prometnog modela na prometni tok ili kretanje vozila, prometni modeli mogu se podijeliti u tri skupine: makroskopski, mikroskopski i mezoskopski, a ponekad se javlja i hibridni prometni model.

Makroskopski model računa cjelokupne karakteristike prometnog toka (brzine, protok, gustoću) i njihove međusobne odnose prema jednadžbi prometnog toka. Također opisuje dinamiku prometnih tokova kao kontinuiranu energiju u smislu protoka, gustoće i prosječne brzine bez razlikovanja pojedinih vozila. Navedeni modeli razvijeni su prvenstveno za simulacije prometa većih cestovnih mreža, a imaju sposobnost predvidjeti prostorni obim te opseg zakrčenosti nekog područja, prouzročene povećanim kapacitetom prometa ili incidentnom situacijom na prometnici. Jedini nedostatak ovog modela je slabije opisivanje interakcije između ulaznog i glavnog toka [36].

Modeli prometnog toka koji prikazuju protok prometa na razini pojedinačnih vozila nazivaju se mikroskopski modeli. Takvi modeli neprekidno izračunavaju parametre kao što su položaj, brzina ili maksimalna akceleracija pojedinačnog vozila tijekom čitave simulacije. Drugim riječima, ne sagledava se kompletan prometni tok, nego pojedino vozilo u prometnoj mreži. Upravo zbog toga što se promatra pojedinačno vozilo, zahtijeva puno više računanja te je vrijeme modeliranja duže ukoliko se radi o većim prometnim mrežama autocesta. Usljed navedenih karakteristika ova vrsta modela pruža vrlo precizne podatke o stanju u prometu [36].

Mezoskopski modeli koriste se karakteristikama oba već opisana modela, određuju i kontroliraju stanja pojedinog vozila koja se temelje na mikroskopskim modelima, a komunikacije i aktivnosti između vozila baziraju se na skupu veza između njih. Navedeni modeli imaju ključnu primjenu u simulacijama s vozilom koje koristi sustav za trenutno informiranje putnika [36].

U prethodnom poglavlju spomenuti nedostatak modeliranja dovodi do procjene kooperativne vožnje pomoću simulacije. No prije svega, simulacija je replikacija stvarnog procesa ili sustava tijekom određenog vremenskog perioda [37]. Temelj za simulaciju je model, a model predstavlja najvažnije značajke ili ponašanje određenog sustava ili procesa, dok sama simulacija donosi evoluciju modela tijekom određenog vremena. S navedenim, tj. odabranim modelom se može testirati određeni koncept, a na temelju eksperimentiranja i evaluacije moguće je donijeti zaključke koji se odnose na ponašanje stvarnog sustava/procesa. Simulacijski modeli se sastoje od nekoliko elemenata: entiteti sustava, ulazne varijable, mjere performansi i funkcionalni odnosi. U najširem smislu, simulacija je alat za procjenu efikasnosti sustava, već postojećeg ili predloženog, tijekom dužih vremenskih razdoblja u stvarnom vremenu. Jedna je od najčešće korištenih metoda kod analiziranja i projektiranja proizvodnog sustava bez eksperimentiranja sa stvarnim sustavom. Dakle, eksperimentira se sa simulacijskim modelom, izrađenim na osnovi stvarnog sustava [38].

Simulacija je korisna prije promjene sadašnjeg sustava ili gradnje novog, a sve u svrhu smanjenja šansi za neuspjeh. Evaluacijom modela moguće je dogovoriti na pitanja poput: „kako će funkcionirati *platooning* na javnim prometnicama?“, „koji scenarij može utjecati na odvijanje *platooninga*?“ ili čak „koja su moguća rješenja scenarija koji neposredno utječu na rad *platooninga*?“.

### **3.1. MOGUĆNOSTI TESTIRANJA PLATOONING KONCEPTA PRIMJENOM SIMULACIJSKIH ALATA**

Među istraženom literaturom navedenog koncepta, a u domeni prometnog modeliranja i testiranja među brojnim alatima najviše se primjenjuju računalni alati, kao što su PTV Vissim (PTV VISSIM) i AIMSUN. PTV Vissim ili jedan od najutjecajnijih mikroskopskih multimodalnih programskih podrška, računalno projicira prometne koncepte svih sudionika u prometu te ocjenjuje i pospješuje performanse prometnih objekata [39]. AIMSUN je tvrtka koja nudi program za simulaciju i usluge za planiranje prijevoza i upravljanje prometom, drugim riječima koristi se za donošenje odluka u stvarnom vremenu o upravljanju cestovnom mrežom [40].

Najveći izazov kod testiranja *Platooning* koncepta u virtualnom okruženju postavljen je na određivanje odnosno kalibraciju parametara dinamike kretanja vozila kako bi se vožnja vozila što više približila autonomnoj. Među spomenutim parametrima najveći naglasak je na

Parametrima osjetljivosti CACC sustava koji prilagođavaju vremenski razmak između FV i LV. Nakon njega slijedi parametar Trenutnog vremenskog razmaka koji je veći od ( $>$ ) gornjeg praga razmaka: FV preuzima ulogu LV, ukoliko LV iz nekog razloga napusti *platoon*. Sljedeći parametar bitan za simulaciju je onaj da je Trenutni vremenski razmak manji od ( $<$ ) Donjeg praga razmaka: FV preuzima ulogu vođe *Platoona* te održava razmak među vozilima s ciljem praćenja vremenskog razmaka unutar *Platoona* (zadano 0,6s). Također vrijedi parametar da ukoliko je trenutni vremenski razmak manji od ( $<$ ) gornjeg praga razmaka i maksimalna veličina *Platoona* je dostignuta: FV postaje vođa *Platoona*, tj. LV s ciljem održavanja međusobnog vremenskog razmaka (zadano 1,5 s). Posljednji parametar nalaže da će FV primijeniti stanje slijeđenja vozila iz prethodnog vremenskog razmaka: Vremenski razmak između donjeg i gornjeg praga razmaka [40].

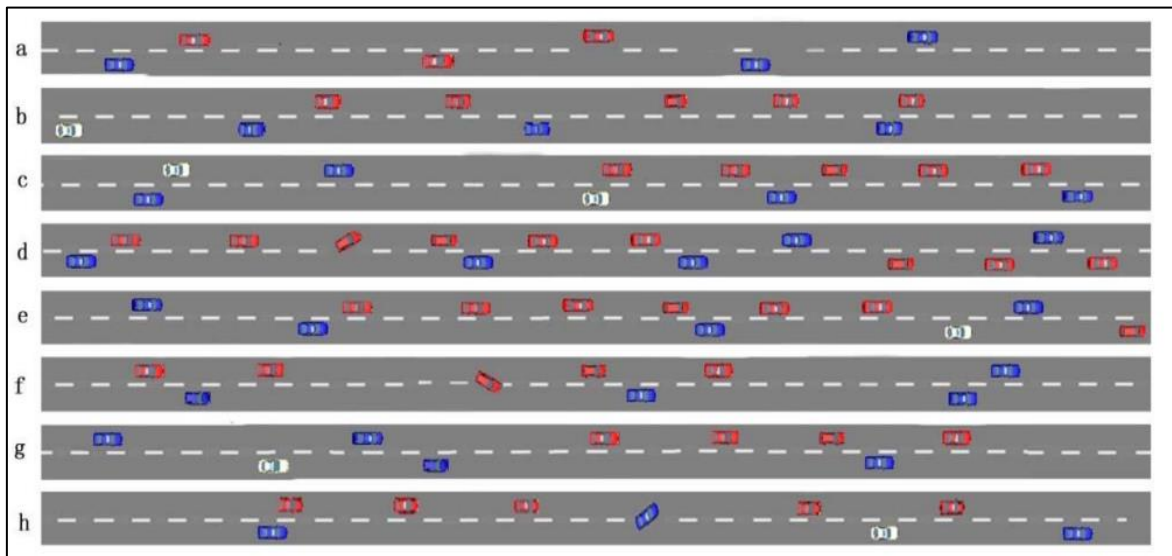
## **3.2. TESTIRANJA U DOMENI PLATOONING KONCEPTA PRIMJENOM MIKROSKOPSKIH PROMETNIH MODELA**

### **3.2.1. Analiza ponašanja međusobno povezanih vozila u *Platoonu***

Autori Zhao i Sun u provedenom istraživanju [41], proučavali su sustav pomoći u prometu koji se sastoji od različitih vrsta vozila (ručno/manualno, ACC i CACC vozilo). Korištenjem aplikacijskog programskog sučelja u mikroskopskoj simulaciji, postiže se cilj izgradnje simulacijskog okvira CACC *Platoona*. Navedeni autori prikazali su testirane manevre poput grupiranja, prilagođavanja, razdvajanja, otpuštanja i spajanja vozila u *platoon*, a provode se pod platformom za simulaciju. Simuliran je i *platoon* sa 6 CACC vozila sa svrhom ispitivanja interakcije u *Platoonu* čime se djelomično utvrđuje i model vozača. Rezultati ovog rada pokazuju povećanje kapaciteta traka nakon prodora CACC vozila na tržište, međutim veličina jednog *Platoona* ima mali utjecaj na prometni kapacitet. Scenarij naziva „Koooperativno adaptivni manevri u *Platoonu*“, prikazuje vozila bez ikakvog CC sustava; ručno upravljana, vozila opremljena ACC sustavom te *Platoone* u kojima se nalaze vozila opremljena CACC sustavom. Vozila su označena različitim bojama; plavom, bijelom i crvenom, a scenarij je prikazan simulacijom u VISSIM programu. Na Slici 9 gdje je prikazan navedeni scenarij, demonstrirani su CACC manevri u sklopu simulacijskog okvira. Na istoj toj slici prikazani su rezultati simulacije *Platoona* koji sadrži 6 vozila. Vozila navedenog *Platoona* nasumično su pridružena simulacijskoj mreži na početku slike, točnije u prvom redu, koji je označen slovom a. Nakon čega su vozila grupirala *platoon*, što je vidljivo u drugom redu, označenom slovom b, a LV svim vozilima *Platoona* signalizira da reguliraju operativne parametre u redu označenom slovom c. U četvrtom redu, označenom



slovom d, vozilu, koje također posjeduje CACC sustav, dopušteno je pridruživanje postojećem *Platoonu*, čiji je napredak prikazan u redu označenom slovom e. Šesti, tj. f red prikazuje vozilo koje napušta grupirani *platoon*, a u predzadnjem redu, označenom slovom g, se taj isti *platoon* prilagođava navedenim promjenama. *Platoon* je naposljetku rastavljen vozilom koje ne posjeduje CACC sustav. Drugim riječima, *platoon* je „razbijen“ i podijeljen u dva manja *Platoona*, kao što se vidi u posljednjem redu Slike 9, označenom slovom h.



**Slika 9. Analiza ponašanja međusobno povezanih vozila u *Platoonu***

Izvor: [41]

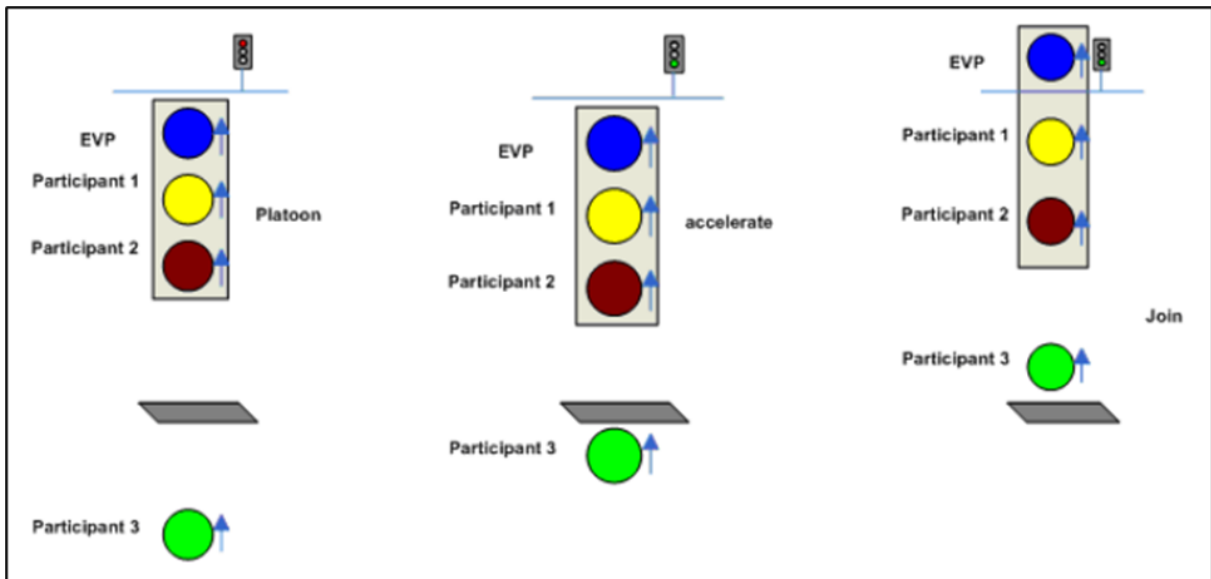
Prikazane simulacije temelje se na pretpostavci da vozila, posebno ona sa CACC sustavom, ne primjenjuju bočno kretanje u mreži s dvije trake tijekom simulacije, npr. promjena trake. Međutim, modeli za tri vrste vozila u poviše navedenoj simulaciji, u prometnom sustavu koriste se bez kalibracije i daljnjih istraživanja zbog ograničenja sposobnosti. Shodno tome, dodavanje modela promjene trake u okvir, te proučavanje njegovih razlika između ACC, CACC i konvencionalnih vozila kako bi se preispitao simulacijski model, od velikog je interesa za buduće radove. Na grafičkom prikazu provedenog testiranja simulacije koje je prikazano iznad, integrirana su dva eksperimenta, a tiču se procesa rada *Platoona* i učinaka na kapacitet prometa. Prvo je ispitan mikroskopski način *Platoona*, a vremenski razmak CACC sustava postavljen je na 0,5s između vozila i željena brzina postavljena je na 80km/h. Obradena i prikazana operacija se odvije u tri razvoja, točnije grupiranje *Platoona*, prilagođavanje razmaka između vozila i učvršćivanje *Platoona*, nakon čega vozila ulaze u simulacijski sustav nasumično, a potom nekoliko vozila

sa CACC sustavom pristaje biti dio *Platoona* i naposljetku nekoliko prilagodbi poput praćenja udaljenosti i brzine kretanja *Platoona*.

### **3.2.2. Integracija vozila s već postojećim nizom vozila na raskrižju upravljano signalnim uređajima**

U sljedećem analiziranom scenariju, autori Gebrewahid i Jokhio [42] usmjerili su istraživanjem na mogućnosti integracije vozila u već postojeći *Platoon* na signalnom raskrižju. Vozila u ovom scenariju označena su bojama plavom, žutom, crvenom i zelenom. U ovom analiziranom scenariju postojeći *platoon*, sastoji se od LV koji je na Slici 11 prikazan kao EVP, te ostalih vozila FV koja su Sudionici 1, 2 i 3 (engl. Participant 1, 2 i 3). Na početku scenarija, kao što je vidljivo na prvom od tri dijela Slike 11, EVP vozilo sa Sudionicima 1 i 2, nalazi se na raskrižju upravljano signalnim uređajem crvenog signala. Preostali sudionik 3 ovog scenarija, postavljen je na unaprijed utvrđenoj udaljenosti od prometne signalizacije. Cilj ostalih Sudionika 1 i 2 jest maksimizirati propusnost na signalnom raskrižju jer će tada Sudionik 3 biti u mogućnosti pridružiti se *Platoonu* prije nego što dođe do aktivacije žutog signala. Kao što je prikazano na drugom dijelu Slike 11, u trenutku kada Sudionik 3 prijeđe prag, označen sivom bojom, aktivira se zeleni signal, a EVP vozilo ubrzava i nastavlja voditi ostale Sudionike 1 i 2, koji također ubrzavaju i samim time surađuju u povećanju propusnosti signalizacije. Ukoliko se svi navedeni uvjeti ispune, posljednji Sudionik 3 nesmetano će se uključiti u postojeći *platoon* i proći signalizaciju prije nego se aktivira crveni signal.

U ovom scenariju se vozilo, koje je udaljeno od *Platoona*, kreće konstantnom brzinom, a nakon što prijeđe određeni prag počinje ubrzavati. Kako bi se to isto vozilo priključilo već grupiranom *Platoonu* prije nego što se aktivira žuti signal, mora ubrzati, a odmah nakon ubrzanja usporiti kako bi se glatko i sigurno priključilo *Platoonu*.



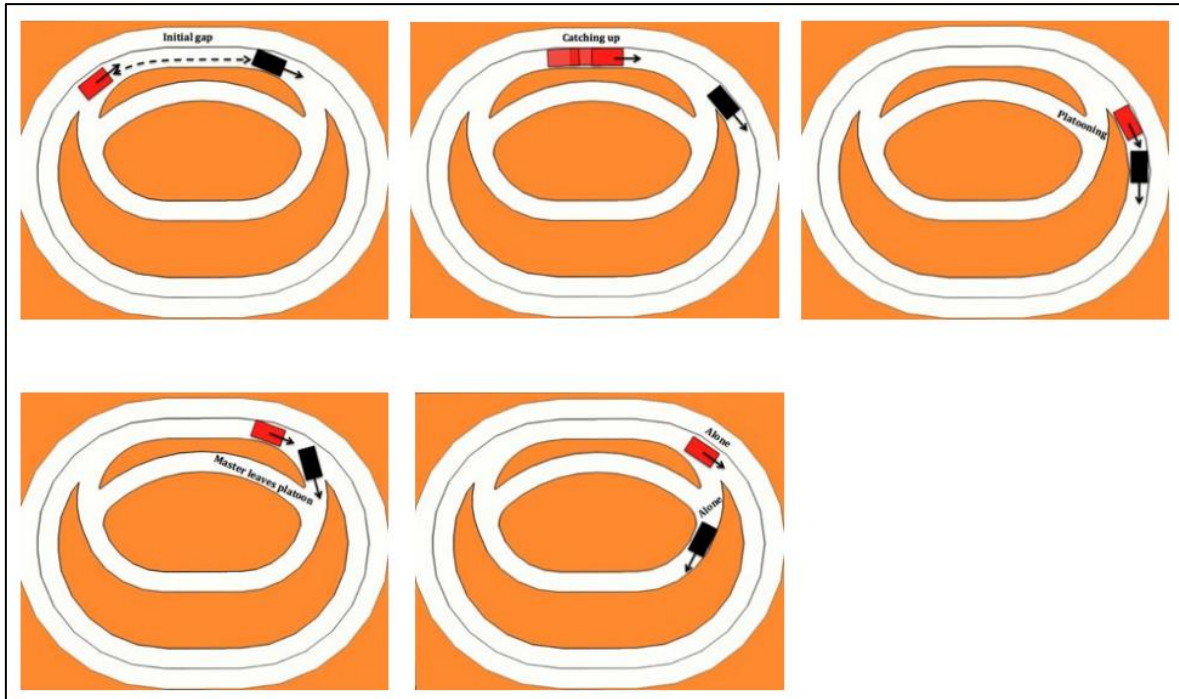
**Slika 10. Scenarij povezivanja vozila sa već postojećim *Platoonom* na raskrižju sa prometnom signalizacijom**

Izvor: [42]

Udaljenost virtualnog praga postavljena je na 750 piksela, a signalizacija je postavljena na 20 sekundi, dok je vrijeme pridruživanja u *platoon* 14 sekundi. U ovom scenariju vozilo; sudionik 3, uspješno je prošlo kroz signalno raskrižje prije nego što je došlo do aktivacije žutog signala. Glavni cilj ovog scenarija je pridružiti se već grupiranom *Platoonu* koji prilazi signalnom raskrižju, a nakon pridruživanja i proći prije nego što se aktivira žuti signal.

### 3.2.3. Grupiranje *Platoona* s vozilima koja imaju različito odredište

U ovom poglavlju prikazan je scenarij autora Lima u radu [43] u kojem vozila, u ovom slučaju teška teretna vozila (engl. heavy duty vehicles – HDV), s različitim odredištima grupiraju *platoon* s fokusom na problemu sustizanja. Postoji nekoliko načina za koordiniranje vozila, a jedan od njih je konceptom *Platooninga* koji donosi znatno smanjenu potrošnju goriva, posebice za HDV vozila. Primjerice, preusmjeravanjem HDV vozila uslijed spajanja ceste. Također jedna od mogućnosti je, ukoliko se HDV vozila kreću istom prometnicom, LV može usporiti, tj. FV može ubrzati i sustići vozilo. Na slici 12 prikazana je situacija scenarija, gdje jedno vozilo pokušava sustići drugo, no kao što je već spomenuto, sa različitim odredištem. Dakle, LV ima drugačije odredište od vozila koje ga slijedi – FV, a svrha ovog scenarija je analizirati utjecaj detalja; drugačijeg odredišta, na vozilo koje odluči sustići drugo vozilo s ciljem grupiranja *Platoona*.



**Slika 11. Scenarij grupiranja *Platoona* s vozilima koja imaju različito odredište**

Izvor: [43]

Na prvom dijelu slike 12 jasno se vidi kako drugo vozilo – označeno crvenom bojom, pokušava sustići prvo vozilo – označeno crnom bojom. Zatim dolazi do sustizanja vozila te se na trećem dijelu grupira *platoon*. Prvo vozilo postaje FV, a drugo vozilo postaje vođa *Platoona*, točnije LV. S obzirom da vozila nemaju iste destinacije na četvrtom dijelu slike jasno je naznačeno kako LV napušta *platoon* (engl. master leaves platoon) te svatko samostalno nastavlja svoj put do prvobitne destinacije. Autor je grafikonima u radu prikazao omjer uštedenog goriva, a rezultati uštede goriva su simulacije scenarija u kojima vozila teže 40 tona, brzina sustizanja je 12,5%, a zadana udaljenost među vozilima *Platoona* je 0,3 metra, što je 9 metara u stvarnoj veličini. Što se vozila dalje kreću svaki u svojem smjeru nakon raskidanja *Platoona*, to manje imaju koristi od odluke o grupiranju istog.

Proučavani su konkretni mogući slučajevi u prometu poput sustizanja drugog vozila i grupiranja *Platoona*, mogući manevri tokom izvođenja *Platoona*. Da bi se grupirao *platoon*, vozila po cestovnoj mreži se trebaju spojiti, s najbitnijim ciljevima uštede goriva i manjeg zagađenja okoliša. Naravno, postoji nekoliko opcija spajanja vozila u *platoon*, no u ovom poglavlju su scenariji sustizanja vozila ispred, što bi značilo da FV ubrzavaju kako bi sustigli vozilo ispred ili već grupirani *platoon* [43]. Najveći problem je razlučiti u kojem trenutku se zapravo događa ušteda goriva s obzirom na trenutak „hvatanja“ drugog vozila koji podrazumijeva dodatnu potrošnju goriva jednog od vozila.

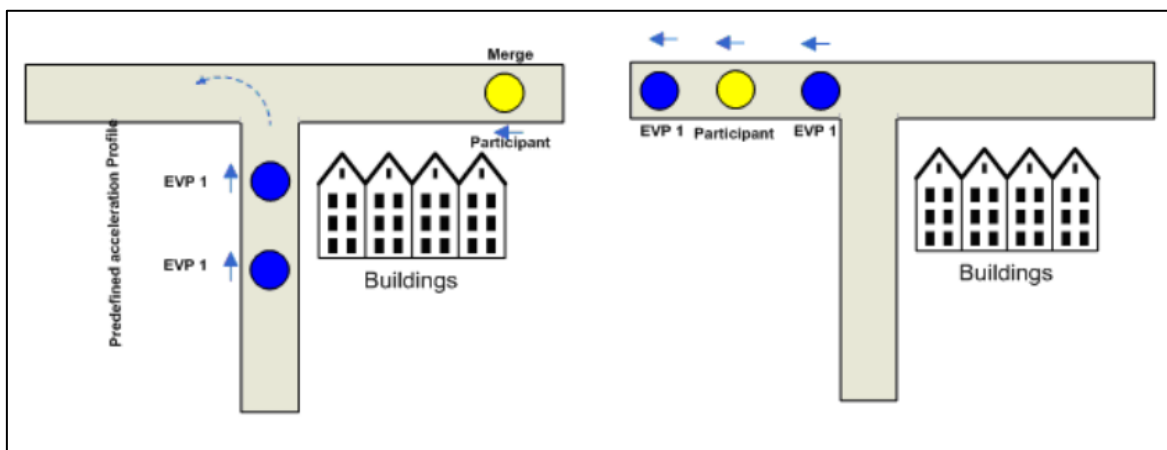
U ranije navedenom radu [41], pa tako i u mnogim drugim literaturama, istražuju se koncepti postojanja individualnih prometnih traka isključivo namijenjenih za koncept *platooninga*. Istražuju se iz razloga brzine i dužine *platooninga* koja može stvarati probleme na prometnicama. Brzina kretanja i dužina *platooninga* je samo jedan u nizu „problema“ za ostali promet koji bi se trebao nesmetano odvijati bez obzira na uvođenje *Platooning* koncepta. Mogući navedeni scenariji, poput inače jednostavne i standardne situacije promjene trake, bili bi puno jednostavniji i „bezbolniji“ kada bi postojala odvojena traka za grupiranje *Platoona*. S druge strane, scenariji poput samog grupiranja *Platoona* gotovo su nemogući, a čak i kada se uspješno grupira *platoon* postoji velika mogućnost nenamjernog „razaranja“ istog od strane vozila koja ne posjeduju C/ACC sustav.

#### **3.2.4. Scenarij grupiranja *Platoona* na primjeru ne signaliziranog raskrižja i nedovoljnom (otežanom) preglednošću**

Za ostvarivanje vožnje CACC sustavi se koriste V2V i V2I komunikacijskom tehnologijom za siguran, neometan i efikasan prijevoz i promet generalno. Navedeni sustavi vožnje ističu se kao izgledna rješenja prometnih situacija poput upravo ove, točnije situacije na ne signaliziranom raskrižju s nedovoljnom, tj. otežanom preglednošću (engl. blind cross). Već spominjani autori u radu [42], koristili su robotsko vozilo znano kao „Platform for Intelligent Embedded Systems“ – PIE. PIE je vozilo opremljeno bežičnim komunikacijskim uređajem, električnim motorima i razvojnom pločom. Također su uspostavljene V2V i V2I komunikacije, a autori ovog rada prikazali su nekoliko *platooning* scenarija. Provedeni scenariji slični su onima analiziranim kroz istraživački projekt „Cooperative Driving Challenge – GCDC“. Učinkovitost algoritma upravljanja *Platoonom* mjeri se u smislu propusnosti (mjera stabilnosti niza povezanih vozila), glatkoće i sigurnosti, pri čemu su zahtjevi sigurnosti kriteriji prolaznosti/neuspjeha.

Navedena prometna situacija prikazana je scenarijem u kojem se testira efikasnost CACC sustava vožnje na slijepom križanju. Kao i u prethodnom scenariju istih autora, vozila koja sudjeluju u *Platoonu* te se kreću unaprijed definiranim brzinama oslovljena su kraticom EVP, a vozilo koje će se priključiti *Platoonu* u ovom slučaju naziva se sudionikom (engl. Participant). Kao što je vidljivo na Slici 10, prvobitno se dva EVP vozila plave boje kreću jednom cestom, a jedno vozilo, žute boje (sudionik), se kreće drugom cestom gdje preglednost nije potpuna. No, putem V2V komunikacijske tehnologije, vozilo Sudionik dobiva sve potrebne informacije, kao što su lokacija i brzina te na temelju tih informacija određuje sposobnost grupiranja *Platoona* s preostala dva EVP vozila. Vozilo Sudionik

trebalo bi proći raskrižje u kratkom vremenskom roku, bez prekoračenja maksimalne brzine od 40 piksela/sekundi te bez kršenja pravila sigurnosti i glatko. Nakon što vozilo prođe navedenim raskrižjem, grupira *platoon* sa preostala dva vozila, kao što je vidljivo na desnom dijelu Slike 10, od kojih je jedno vodeće – LV, a ostala dva slijedeća – FV vozila. Propusnost se u ovom scenariju mjeri kao vrijeme potrebno sudionicima da prođu raskrižjem, a varijanca ubrzanja određena je kao ukupni zbroj svih ubrzanja tijekom cijele faze scenarija.

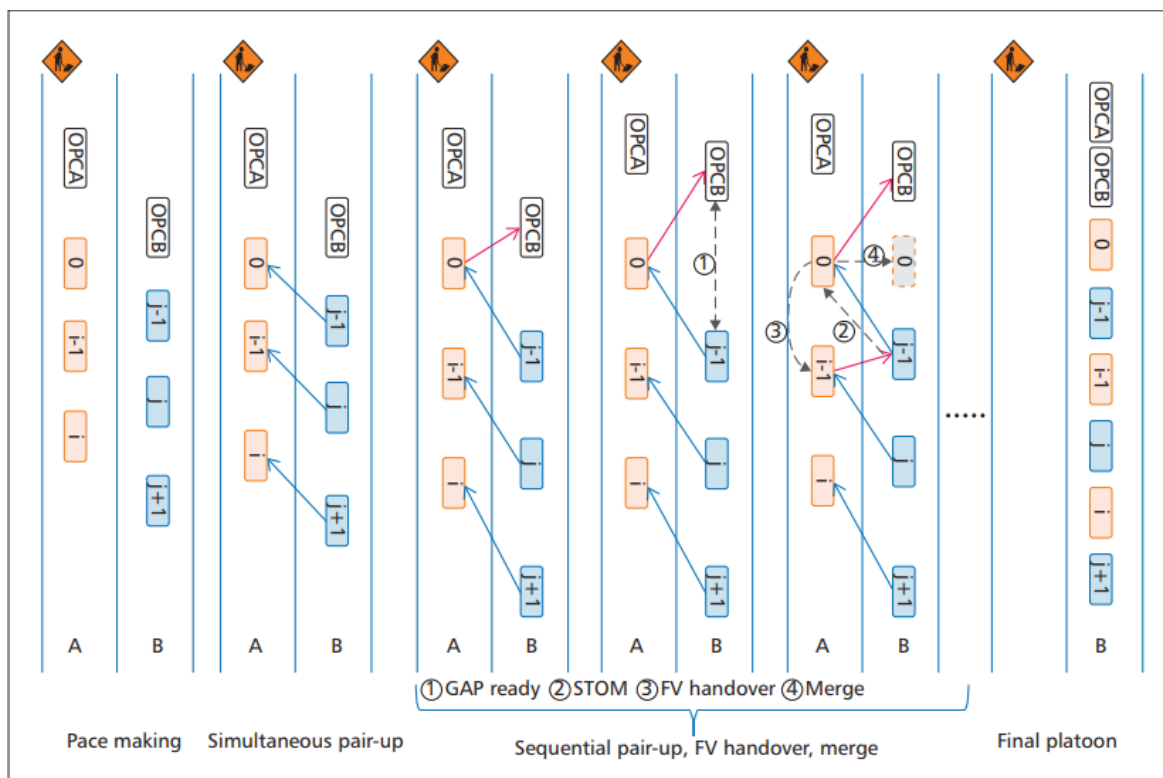


**Slika 12. Prikaz scenarija na ne signaliziranom raskrižju sa nedovoljnom preglednošću**

Izvor: [42]

### 3.2.5. Spajanje dvaju već grupiranih *Platoona* uslijed radova na cesti

U projektu GCDC2011 [42] demonstriran je osnovni koncept *Platooninga*, a na Slici 13 prikazane su napredne operacije koje je potrebno dodatno istražiti kako bi se ostvario budući razvoj. U ovaj scenarij uključena su dva *Platoona* koja se kreću autocestom u različitim trakama, no zbog nadolazećeg gradilišta gdje je jedna traka zatvorena za promet, moraju se spojiti u jedan *platoon*. Scenarij obuhvaća uobičajene događaje u cestovnom prometu, uključujući radove na cesti, zatvaranje traka, spajanje prometa itd. Očekivano je rješavanje svih događaja komunikacijom i suradnjom među vozilima.



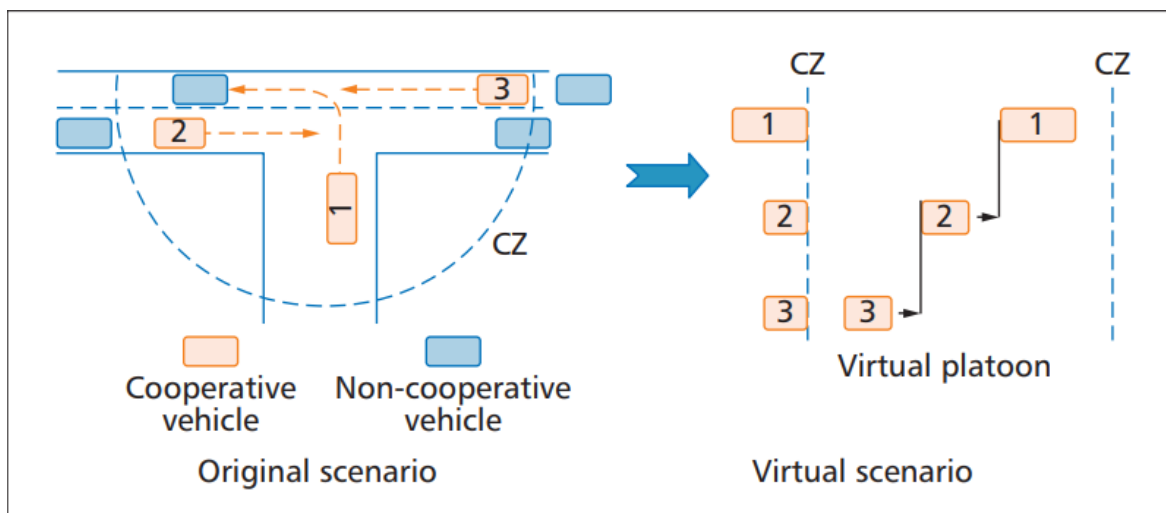
**Slika 13. Proces interakcije spajanja dvaju *Platoona***

Izvor: [44]

Već spomenuti scenarij i postupak interakcije spajanja dvaju *Platoona* prikazan je na Slici 13. Cestovne trake su na slici označene slovima A i B, jedan već grupirani *platoon* je plave boje, a drugi narančaste te se svaki sastoji od tri vozila. Prvi dio slike označava uspostavu konstante brzine kretanja oba *Platoona* (engl. Pace making). Nakon što se uspostavi konstantna jednaka brzina dva usporedna *Platoona*, moguće je daljnje ostvarivanje postupka spajanja istih navedenih *Platoona* u jedan. Daljnji razvoj na drugom dijelu slike, koji se još naziva simultano uparivanje (engl. Simultaneous pair-up), je plavim strelicama naznačen, drugim riječima svako narančasto vozilo, točnije vozila 0, i-1 te i, prijeći će u desnu traku između plavih vozila, tj. vozila j-1, j te j+1. Treća situacija ovog scenarija se sastoji od 4 koraka, a prvi korak je stvaranje, tj. priprema razmaka između vozila označenih plavom bojom (engl. Gap ready), kako bi se vozila jednostavnije bežično spojila te grupirala jedan *platoon*. Nakon ispunjenja navedene situacije slijedi primopredaja FV (engl. FV handover) novom vođi *Platoona*; vozilu narančaste boje označenom brojem 0. Na predzadnjem dijelu slike prikazana je i konačna situacija sjedinjavanja dvaju *Platoona* (engl. Merge), a po završetku te situacije se stvara završni *platoon* (engl. Final platoon) koji je od početka scenarija bio planiran s obzirom na radove na cesti.

### 3.2.6. Scenarij prolaska raskrižja CACC vozila

Raskrižja su jedna od kritičnijih i izazovnijih prometnih okruženja, a projekt GCDC2016 razmotrio je veoma uobičajenu situaciju raskrižja koja je prikazana scenarijem. Da bi bio jasniji i precizniji za buduću primjenu i realizaciju, navedeni scenarij obuhvaća kombinaciju manualnih vozila, koja međusobno ne komuniciraju, i vozila sa CACC sustavom [44].



**Slika 14. Scenarij koncepta raskrižja sa CACC vozilima i manualnim vozilima te virtualni scenarij**

Izvor: [44]

Na Slici 15 prikazan je scenarij koncepta raskrižja sa CACC vozilima i manualnim vozilima te virtualni scenarij također. CACC vozilo, označeno narančastom bojom (engl. Cooperative vehicle), približava se prometnici s dvije trake gdje se promet odvija u oba smjera. Zatim, isto to vozilo prenosi svoju namjeru skretanja lijevo na raskrižju, a ostala CACC vozila koja se nalaze na glavnoj cesti uvažavaju njegov zahtjev skretanja i olakšavaju mu prolazak raskrižja. Drugim riječima, vozila na glavnoj cesti stvaraju potrebne i odgovarajuće razmake, omogućujući time nesmetan prolazak za vozilo koje skreće lijevo, a samim time dolazi do poboljšanja sigurnosti i učinkovitosti prometa.

Treći scenarij GCDC2016 [44] projekta uključuje vozilo hitne pomoći koje zahtijeva prolaz u preopterećenoj prometnoj situaciji. Ovo je demonstracijski scenarij, a razmatra se svakodnevni prometni događaj koji zahtijeva efikasna rješenja. Upozorenje o vozilu u nuždi, već je razmatrano u kontekstu autonomnih vozila međutim, trenutna inačica pruža samo upozorenje na vozilo hitne pomoći, ali rješenje problema gdje smjestiti vozilo u trenutku nužde još uvijek nije pronađeno. Zahvaljujući predloženim izmjenama, vozilo hitne pomoći



moći će informirati ostala vozila u prometu o svojem putu i načinu na koji želi da se ostala vozila ponašaju, a samim time omogućiti će se slobodan i siguran prolaz u nužnim i bitnim situacijama.

Ovi scenariji demonstriraju situacije u kojima automatizirana vozila i vozila sa integriranim CACC sustavom mogu donijeti značajnu korist cestovnom prometu. U tom pogledu GCDC2016 neusporedivo je izazovniji od svog prethodnika iz 2011.-te godine (GCDC2011). Tehnički je izazovno razviti i primijeniti funkcije za navedena vozila te je potrebna polivalentnost kako bi se organizirala i omogućila komunikacija i razmjena poruka skupini vozila. Ovaj projekt pruža jedinstvenu priliku za prikaz napretka u razvoju distribucije i kolaborativnog okruženja, te je kombinacija natjecanja i suradnje s obzirom da navedeni scenariji iziskuju interakciju i suradnju između timova. Komunikaciju ostvaruju bežičnim načinom, a pružena im je potpuna fleksibilnost što se tiče područja kontrolnih sustava.

## 4. AKTUALNA ISTRAŽIVANJA U DOMENI PLATOONING KONCEPTA

Proveden je vrlo velik broj projekata o grupiranju *Platoona* i C/ACC sustavu za kontrolu vožnje, a projekti su prvobitno pokrenuti u svrhu istraživanja područja optimalnosti, na koji način povećati sigurnost, pružiti što veću pomoć vozačima u vožnji i slično. Nadalje je prikazan kratak pregled nekoliko projekata koji su važni i odnose se na grupiranje *Platoona* i sve u svezi s istim. Pojediniosti o *platooning* konceptu razlikuju se među projektima jer svaki projekt zasebno ima različite ciljeve i motivacije za izvođenje *Platoona*, a samim time su i tehnička rješenja različita.

### 4.1. PROJEKT CHAUFFEUR

Prvo istraživanje o *platooning* konceptu započelo je u Europi 1996. godine pod nazivom projekt Chauffeur, financiranim od strane Europske komisije. Prvi kamionski tegljač razvijen je u okviru navedenog istraživanja gdje su, između ostalih, sudjelovali proizvođači kamiona Daimler, Renault i IVECO [45]. U ovom istraživanju prikazana je uzdužna i bočna kontrola za FV, a vozač upravlja LV. Dok vozila koja ga prate – FV, su na vrlo maloj udaljenosti iza njega, a dodatna cestovna infrastruktura nije nužna. Pomoću ugrađenog sustava za obradu slike, vozilo dohvaća informacije o relativnom položaju LV-a, a i FV-a za uzdužnu i bočnu kontrolu. V2V komunikacijska tehnologija, dodatno pruža informacije o stanju LV-a, poput lokacije, brzine, smjera kretanja te još mnogih drugih. Ovo znanstveno istraživanje sastoji se od dvije faze, a započinje detaljnom analizom zahtjeva korisnika, a nekoliko će ih biti aktivno uključeno u svim fazama provedbe. Nakon analize, posebni elektronički moduli bit će ugrađeni u vozila, u ovom slučaju kamione, a sustavi će se testirati i ocjenjivati. „Tow Bar“ koncept ispitivati će se u standardnim prometnim uvjetima, dok će se za *platooning* provoditi studije izvodljivosti [46]. U ovom istraživanju predloženi su i ispitivani sofisticiraniji sustavi koji omogućuju elektroničko povezivanje vozila. Drugim riječima, jednostavniji sustavi – dva vozila elektronički povezana; FV pod kontrolom LV. Prednosti ovakvih sustava uključuju smanjenje prometnih zastoja, bolju učinkovitost postojeće infrastrukture te uštedu troškova za korisnike. Novi sustavi neće samo osigurati nove proizvode tržištu, također će omogućiti tvrtkama učinkovitiju konkurenciju na svjetskom tržištu. Sustavi koji se razvijaju u znanstveno-istraživačkom projektu pod nazivom „Chauffeur“, omogućit će tvrtkama pristup ovim novim tržištima. Ovo istraživanje rješava problem razvijanjem sustava koji će zasigurno povećati gustoću teretnog prometa, ali i omogućiti veću učinkovitost prometnica. Chauffeur, kao što je već spomenuto, sadrži

dvije faze, prva „Tow Bar“ u kojoj su dva vozila, u ovom slučaju kamiona, povezana bežičnom komunikacijom. Posljedica toga je moguće povećanje propusnosti prometa, a samim time će se i veća količina robe transportirati tokom jednog radnog dana. U drugoj fazi, obrađivano istraživanje proširuje se na pojam *platooninga* i automatizirane vožnje, gdje je nekoliko kamiona povezano. To sve skupa otvara nove mogućnosti potpune automatizacije infrastrukturnih sustava vozila te povezivanja prijevoza drugim načinima, u sustavu pod potpunom kontrolom.

## 4.2. PROJEKT PATH

PATH je znanstveno istraživački projekt, pokrenut u Kaliforniji, o automatiziranom *Platoonu*, motiviran potrebom povećanja kapaciteta prometnih traka. Kinematičke studije, koje proučavaju gibanje, tj. kretanje tijela, pokazale su mogućnost povećanja kapaciteta prometne trake u kojoj se kreću osobna vozila ukoliko se ta ista vozila kreću u *Platoonu*. Duljina razmaka između dva ili više *Platoona* predviđena je dovoljno da osigura sudionike u prometu čak i u uvjetima prometne nesreće, uz nagla i maksimalna usporavanja. Drugim riječima *platoon* se može zaustaviti bez da LV dođe u doticaj sa posljednjim FV prednjeg *Platoona*. Opsežnija studija simulacije kapaciteta *Platoona*, točnije sigurnosti pri prometnoj nesreći pokazala je prednosti *platooning* koncepta u odnosu na pojedinačno automatizirano vozilo. Navedene studije zasnivale su se na premisi da su sva vozila automatizirana, uključujući i LV, u svrhu maksimiziranja učinkovitosti te otklanjanja mogućnosti pogreške vozača koje uzrokuju prometne nesreće [47]. Ovaj projekt, 1994. godine, prvi puta je testirao uzdužnu kontrolu *Platoona* s četiri vozila koja su bila na udaljenosti od 4 m pri brzinama koje su dozvoljene na autocesti. Zatim, 1997. godine, u sklopu projekta razvio se *platoon* sa osam vozila za Nacionalni konzorcij automatiziranih sustava autocesta. Velik broj posjetitelja testiralo je demonstracijske vožnje s raznim manevrima, uključujući i promjenu trake, isto tako i pridruživanje i napuštanje *Platoona*, kao i standardno praćenje vozila, a sve to pod potpunom automatskom kontrolom. Nije zahtijevalo veliku elektroničku snagu, a V2V komunikacijska tehnologija i sva koordinacija te obrade signala senzora nalazili su se u Pentium računalu koje radi na 166 MHz. Unutar *Platoona*, razmaci su održavani odstupanjem od 20 cm, što je dovoljno malo da se osoba u vozilu osjeća kao da je spojena mehaničkom spojkom s vozilom koje prethodi, a istovremeno zadržava glatku kvalitetu vožnje, a samim time i udobnost tokom vožnje. Nedavno, PATH projekt i njegova istraživanja o *Platoon* konceptu više se usredotočuju na teška vozila, tj. kamione, radi mogućnosti smanjenja potrošnje goriva koja proizlazi iz smanjenog aerodinamičkog otpora.

Teški kamioni u blisko grupiranom *Platoonu* od tri vozila imaju mogućnost pružanja kapaciteta od čak 1500 kamiona po traci na sat, a to je dvostruko veći kapacitet od već svakidašnjeg s pojedinačnom vožnjom kamiona po prometnicama.

Navedeni eksperimenti *Platoona* s kamionima pokazali su tehničku ostvarivost vožnje dva teška vozila s razmakom od 3 metra te tri teška vozila s razmakom od 4 metra među kamionima. Također je, kao rezultat, potvrđena izravna ušteda goriva s rasponom od 5% za LV i 10-15% za FV-s. Potencijalno, postoji mogućnost barem dvostruko veće uštede goriva od navedene, u situaciji kretanja kamiona u *Platoonu*, brzinom specifičnom za autoceste i atmosferskim tlakom na razini mora ili blizu njega. Iz PATH projekta može se zaključiti da teška vozila, točnije kamioni u *Platoonu* donose veću uštedu goriva, a osim toga dvostruko veći kapacitet od pojedinačne vožnje kamiona prometnicama [47].

### **4.3. PROJEKT ENERGY ITS**

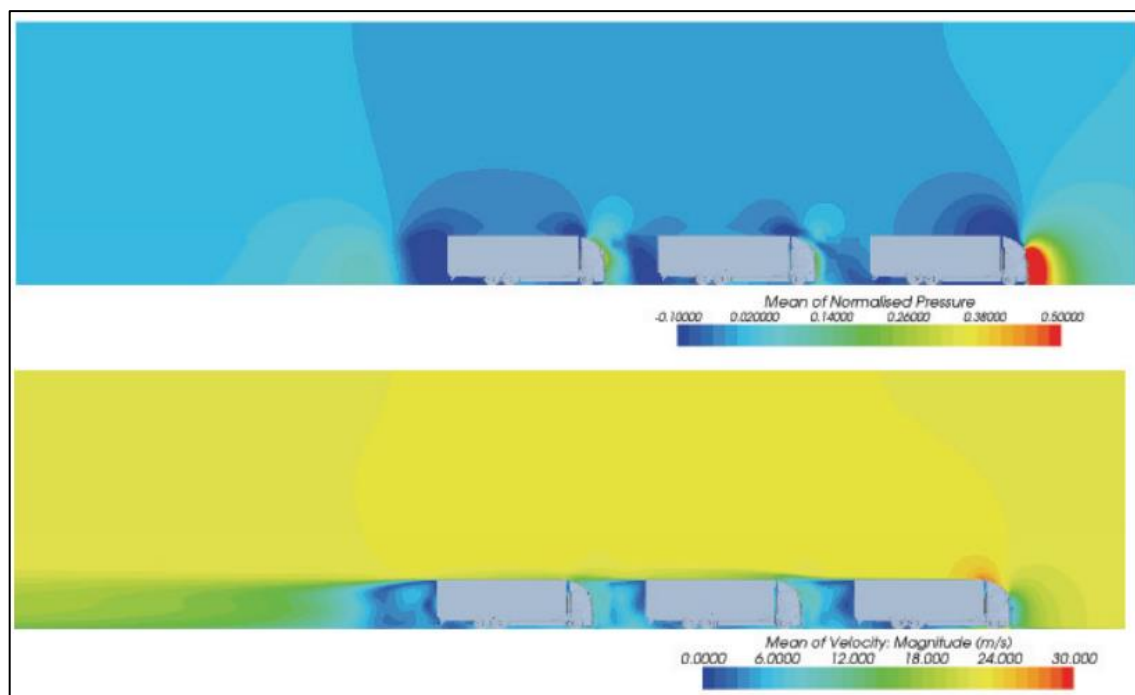
U svijetu je pokrenuto mnoštvo ITS projekata, uz sigurnost usmjereni su i na energiju i okoliš, a jedan od takvih je i projekt "Energy ITS", pokrenut od strane japanskog Ministarstva gospodarstva, trgovine i industrije, 2008. godine. Projekt obuhvaća istraživanje automatiziranih kamionskih *Platoona* te metode procjene učinkovitosti ITS-a na uštedu energije [48].

*Platoon* se u ovom projektu sastoji od 3 kamiona s koji se kreću brzinom od 80 km/h s međusobnim razmakom od 10 metara. Bočna kontrola temelji se na detekciji markera trake od strane računalnog vida, a longitudinalna kontrola temelji se na mjerenju razmaka radarom i LiDAR-om uz V2V komunikaciju temeljenu na DSRC. Također je važno napomenuti da radar i LiDAR imaju mogućnost detekcije prepreka u prometu. Postavljeni razmak od 10 metara na brzini kretanja od 80 km/h može dovesti do povećanja uštede energije za oko 15%. Simulacija dokazuje učinkovitost *Platooning* koncepta s međusobnim navedenim razmakom i brzinom kretanja te smanjenje CO<sub>2</sub> za 2,1% duž prometnice. Motivacija Energy ITS projekta [47] je ublažavanje nedostatka kvalificiranih vozača, a cilj ušteda energije i prevencija globalnog zatopljenja pomoću već navedenih ITS tehnologija. Točnije razvoj automatiziranog kamionskog *Platoona* koji će pridonijeti uštedi goriva i smanjenju CO<sub>2</sub>. Oblici automatizirane vožnje mogu se podijeliti na autonomni i kooperativni tip. Autonomni je temeljen na ugrađenom računalnom vidu te je prikladan za vozila koja prelaze velike udaljenosti jer nema potrebe za infrastrukturnom opremom, a samim pojednostavljuje se integracija automatiziranog sustava vožnje, tj. *platooning* koncepta u promet. U slučaju

korištenja kooperativnog modela vožnje, koji uz opremu na vozilu zahtjeva i opremu uz prometnice, troškovi izgradnje i održavanja bili bi visoki, a vožnja na velike udaljenosti ne bi bila izvediva.

Od početka istraživanja automatizirani sustavi vožnje integriraju se uglavnom s osobnim vozilima, no kamioni su ti koji su pogodniji za uvođenje iste, a samim time i grupiranje automatiziranog *Platoona*, čak iz nekoliko razloga. Postotak korištenja kamiona je mnogo veći od onog kod osobnih automobila, što ukazuje na znatno veću uštedu energije pri primjeni kamiona za *platooning* koncept. Ovaj projekt potiče uvođenje *platooning* koncepta, naročito za prijevoznike tereta jer se ulaganje u automatiziranu opremu i vožnju općenito može vratiti uštedom goriva i smanjenjem CO<sub>2</sub>. Ovakva vožnja će također smanjiti opterećenje vozača, što je posebice idealno za vozače kamiona koji većinom prealjuju veće udaljenosti te neusporedivo veći broj kilometara od vozača osobnih automobila, a smanjenjem opterećenja vozača povećava se sigurnost u prometu. Prometne nesreće u kojima sudjeluju kamioni u većini slučajeva rezultiraju većim posljedicama od onih gdje sudjeluju samo osobna vozila. S obzirom da su vozači kamiona profesionalni vozači, činjenica je da upravljaju i služe se automatiziranim sustavom vožnje bolje nego bilo koji drugi vozač. Navedena činjenica implicira na jednostavnije grupiranje *Platoona* vozačima kamiona nego što je to vozačima osobnih vozila.

Mikroskopski modeli, kao što je već spomenuto, neprekidno izračunavaju parametre poput položaja, brzine ili maksimalne akceleracije pojedinog vozila tijekom cijele simulacije. U ovom projektu [48] provedena je računaska simulacija s ciljem istraživanja smanjenja aerodinamičkog otpora pri *platooning* konceptu. Rezultati simulacije kretanja kamiona pri brzini od 80 km/h s međusobnim razmakom od 4 metra prikazani su na Slici 13. Na spomenutoj Slici 13, prikazani su smanjeni otpor zraka (engl. mean of normalized pressure) i srednja vrijednost brzine zraka (engl. mean of air velocity). Vrijednost koeficijenta otpora LV i zadnjeg FV opada za više od 20%, a srednjeg FV za oko 50%. Dakle aerodinamički otpor se smanjuje ukoliko se 3 kamiona kreću s vrlo malim razmakom međusobno, što s druge strane doprinosi uštedi energije; smanjuje potrošnju goriva. Kamioni voze velikom brzinom čime se povećava aerodinamički otpor, a potrošnja goriva *Platoona* smanjuje se za oko 15%.



**Slika 15. Rezultati simulacije kretanja kamiona pri brzini od 80 km/h s međusobnim razmakom od 4 metara**

Izvor: [48]

**Tablica 2. Potrošnja goriva u postocima, mjerena tijekom izvođenja *platooning* eksperimenta**

Mjesto vožnje	Razdaljina vožnje	Potrošnja energije jednog vozila			
		Vodeći kamion	Srednji kamion	Posljednji kamion	Srednja vrijednost
Brza cesta prije javne uporabe	8 km (3 puta)	+7,5%	+18%	+16%	+14%
Ispitna staza – ovalna	oko 100 km	+7,5%	+17,5%	+14%	+13,8%

Izvor: Prilagodio autor sukladno [48]

Potrošnja goriva mjerena je tijekom pokusa na probnoj stazi (ispitna staza – ovalna) i uz brzu cestu prije javne uporabe pod uvjetom da je brzina od 80 km/h konstantna, razmak je 10 m, a utovar prazan. Rezultati na tablici 1 pokazuju sličnu tendenciju kao i rezultati simulacije kretanja kamiona pri brzini od 80 km/h s međusobnim razmakom od 4 metara, a potrošnja energije za *platoon* od 3 kamiona može se poboljšati za oko 14 %.

Za razliku od mikroskopskih, makroskopski modeli računaju cjelokupne karakteristike prometnog toka poput brzine, protoka i gustoće, te njihove međusobne odnose prema

jednadžbi prometnog toka. Također je važno napomenuti da se u ovom slučaju koriste navedeni modeli jer su prije svega namijenjeni za simulacije prometa većih cestovnih mreža te imaju sposobnost predvidjeti prostorni obujam ili zakrčenost nekog određenog područja.

“Energy ITS” je razvoj metode procjene učinkovitosti ITS-a na smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, a simulacijska studija je provedena u okviru ove teme kako bi se procijenila učinkovitost *platooning* koncepta s obzirom na makroskopski aspekt [48]. Rezultati ukazuju na smanjenje CO<sub>2</sub> duž prometnica za 2,1% ukoliko je razmak između kamiona 10 m, odnosno 4,8% ukoliko je razmak 4 m. Projektom je utvrđena buduća (2030.g te nadalje) mogućnost kretanja posebnom trakom na prometnicama potpuno automatiziranog *Platoona* od 3 ili 4 kamiona, a vozač je prisutan samo u LV. Cilj uštede energije je 18% kao posljedica aerodinamičkog otpora i 10% uslijed ekološke vožnje. Duljina *Platoona* je ograničena s obzirom da *platoon* veće duljine može ometati ostali promet, u ovom projektu maksimalna duljina *Platoona* je 4 kamiona.

#### **4.4. PROJEKT „GRAND COOPERATIVE DRIVING CHALLENGE“**

Predstavljen je projekt naziva Inicijativa kooperativne vožnje (engl. Grand Cooperative Driving Challenge – GCDC), s ciljem poticanja uvođenja kooperativnih automatiziranih vozila putem bežične komunikacije [44]. Sažeta su iskustva iz prethodnog izdanja GCDC-a, koji je održan u Nizozemskoj 2011. godine. Specificirana su i prikazana dva scenarija izazova, spajanje dvaju CACC *Platoona* i prolazak raskrižja. Demonstracijski scenarij za vozila hitne pomoći osmišljen je kako bi se prikazale prednosti kooperativne vožnje. Komunikacije pomno prate novoobjavljene standarde kooperativnog inteligentnog transportnog sustava, dok su protokoli interakcije dizajnirani za svaki od scenarija. U 2011. godini devet međunarodnih timova uključilo se u GCDC projekt, s ciljem podrške i ubrzanja integriranja CACC i automatiziranih vozila u svakodnevnicu. Izazov je bio izvođenje *Platoona* gdje se vozila kreću u grupiranom nizu sa što manjim međusobnim razmakom sa svrhom uštede goriva te poboljšanja sigurnosti i propusnosti. Danas proizvođači automobila neprestano uvode nove automatizirane značajke kako bi povećali sigurnost i udobnost vozačima i putnicima u vozilu. U tom kontekstu pojavljuju se dva područja koja se međusobno isprepliću, CACC sustav i autonomna vožnja. Vozila sa CACC sustavom funkcioniraju suradnjom putem V2V komunikacije, dok vozila tokom autonomne vožnje imaju sposobnost kretanja samo uz podršku ugrađenih senzora.



**Slika 16. Rezultati simulacije kretanja kamiona pri brzini od 80 km/h s međusobnim razmakom od 4 metara**

Izvor: [44]

Za oba spomenuta scenarija, kriteriji ocjenjivanja temeljili su se na ukupnoj duljini *Platoona*, varijacijama duljine *Platoona*, duljini razmaka vozila i stabilnosti *Platoona*, odnosno sposobnosti vozila da ublaže učinke poremećaja ubrzanja. Vozači su manualno kontrolirali bočno upravljanje, a u vozilima je bilo uključeno automatizirano uzdužno upravljanje. Dok su se izvodile osnovne operacije *Platoona* poput spajanja u već postojeći *platoon* ili grupiranja istog na jednoj traci, kompliciranije operacije poput spajanja *Platoona* iz dvije paralelne trake bile su neostvarive. Tijekom GCDC projekta pojavilo se mnoštvo izazova od različitog interpretiranja primjerice vremena i položaja, do problema s refleksijama radara. Jedan od ključnih izazova bila je bežična komunikacija, gdje su svi učesnici trebali protumačiti prenete informacije na isti način. Ovi problemi usmjereni su na interoperabilnost između primjena ovisnim o dobavljačima, što je važno za upravljanje implementacije CACC sustava u vozila u stvarnom prometu. Najvažnija ideja ovog projekta je poticanje implementacije CACC sustava te automatizirane vožnje u realni i svakidašnji promet. Izdvojeni scenariji uzimaju u obzir i trenutačni razvitak unutar C-ITS-a, prijedloge znanstvenika iz domene, kao i prijedloge timova koji sudjeluju. Razmatrana su dva tipična



okruženja: autocesta i raskrižje, a scenariji su testirali aspekte suradnje s obzirom na osnovni skup aplikacija u C-ITS standardima te potencijalno daljnje širenje na unaprijeđeni skup aplikacija [44].

**Tablica 3. Usporedba četiri *Platoon* projekata**

Projekt	Tip vozila	Upravljanje	Infrastrukturni zahtjevi	Integracija prometa	Senzori	Ciljevi
CHAUFFEUR	Mješoviti	Bočno upravljanje + longitudinalno upravljanje	Nijedan	Autocesta ili mješovita	Produkcija	Udobnost, sigurnost, zagušenja, energija
PATH	Automobili ili teška vozila	Bočno upravljanje + longitudinalno upravljanje	Referentni markeri na cesti	Namjenska traka	Miješani	Povećana propusnost po traci, ušteda energije
ENERGY ITS	Mješoviti	Longitudinalno upravljanje	Prošireni GPS	Miješana	"State of the Art" (SoA) i produkcija	Ubrzati implementaciju sustava kooperativne vožnje
GCDC	Teška vozila	Bočno upravljanje + longitudinalno upravljanje	Oznake trake	Namjenska traka	"State of the Art" (SoA)	Umanjiti nedostatak kvalificiranih vozača

Izvor: Prilagodio autor sukladno [44]

Tablica 3 prikazuje pregled četiri ispitana projekta o konceptu *Platooninga*. U tablici se uspoređuje šest parametara: tipovi vozila u *Platoonu*, smjer upravljanja vozilom, zahtjevi ili potencijalne izmjene infrastrukture, integracija prometa, primarni senzori koji se koriste te glavni ciljevi *Platoona*.

Neke od značajki koje izdvajaju PATH projekt od ostalih [47] navedenih te obrađenih projekata su: sva su vozila potpuno automatizirana, uključujući i LV vozilo, odvojeni *Platooni* za autobuse ili kamione kako bi se izbjegli sigurnosni problemi s ostalim neusklađenim velikim brojem vozila u slučaju prometne nezgode, bočna kontrola relativna u odnosu na standardne oznake trake, ali uzdužna kontrola relativna u odnosu na prethodno vozilo i LV vozilo, koncept *Platoona* u prometnoj traci zaštićenoj od ulazaka vozila bez mogućnosti grupiranja *Platoona*, u svrhu povećanja sigurnost i svođenja neočekivane opasnosti i potencijalnih prometnih nezgoda na minimum.

## 5. ZAKLJUČAK

Brzim, naglim i rapidnim rastom, promet je jedan od glavnih problema suvremenog svijeta. Rastom broja populacije povećava se broj putnika i vozača, a posljedica toga je povećan broj vozila na prometnicama. Spomenuti sve veći brojevi vozila uzrokuju i sve više prometnih nezgoda na prometnicama, veću zagađenost zraka, a zelene površine postaju prometna infrastruktura. Govoreći o modernom svijetu, na svim poljima života, najvažniji je faktor sigurnosti čovjeka, no ne i jedini. Očuvanje okoliša veoma je važna stavka, stoga je glavna svrha ITS-a istražiti i implementirati rješenja koja će umanjiti, a po mogućnosti i riješiti prometne nedostatke na već postojećoj infrastrukturi u svrhu daljnjeg uništavanja kako zelenih površina tako i zraka, emisijama i CO<sub>2</sub>. Navedeno se može postići uvođenjem i integracijom „pametnih“ i inovativnih tehnologija, a ne isključivo gradnjom novih objekata. Spomenuti, najvažniji faktor na svim poljima ljudskog života, sigurnost, povećati će se jedino ako svi sustavi vozila funkcioniraju i surađuju na unaprjeđenju preglednosti i čitljivosti oznaka na kolniku, prometnih znakova uz prometnice i privremenih znakova i uređaja za kontrolu prometa. Međutim, treba napomenuti činjenicu da niti jedan sustav ne može jamčiti stopostotnu sigurnost.

*Platooning* je od velike važnosti jer se u svim obrađenim literaturama pretpostavlja da će biti jedna od najranijih primjena automatizacije cestovnih vozila koja će biti tržišno isplativa i prihvatljiva. „Truck Platooning“ budućnost je transporta u kojoj kamioni povezani bežičnim komunikacijskim tehnologijama voze s razmakom manjim od 1 sekunde, a sve to zahvaljujući automatiziranoj tehnologiji vožnje. Također treba naglasiti „društvenu korist“ od manjeg broja prometnih nezgoda na prometnicama, a samim time sigurniji promet te manja opterećenost prometnica.

Zbog navedenog stalnog povećanja broja vozila, odnosno povećanja prometnog opterećenja dolazi do sve češćih i intenzivnijih prometnih zagušenja, porasta broja incidentnih situacija u prometu te općenito smanjenja kvalitete prometnog sustava. Negativni učinci naglog porasta broja vozila posebno su izraženi u gradskim sredinama te pripadajućim autocestama, gdje su proširenja prometnica, odnosno mogućnosti povećanja kapaciteta prometnica fizičkom nadogradnjom vrlo ograničene. Rješenje tog problema nalaze se u informacijsko – komunikacijskoj nadogradnji klasičnog sustava prometa, što predstavlja opću definiciju ITS-a.

Još uvijek postoje otvoreni izazovi koje je potrebno premostiti da bi navedeni koncept postao uobičajena značajka cestovnog prometa. Pod uvjetom da u budućnosti dođe do napretka mreže cestovnog teretnog prometa i komunikacije, ne samo među kamionima, već među svim vozilima na prometnicama, sve navedene izazove u ovom radu biti će moguće savladati. Čak i najmanja poboljšanja učinkovitosti mogu imati znatnu isplativost.

## POPIS LITERATURE

- [1] Janssen, G. R. et al., 2015, `Truck Platooning Driving the Future of Transportation`
- [2] SAE International, `SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION, online: [https://www.sae.org/binaries/content/assets/cm/content/blog/sae-j3016-visual-chart\\_5.3.21.pdf](https://www.sae.org/binaries/content/assets/cm/content/blog/sae-j3016-visual-chart_5.3.21.pdf) (20.06.2022.)
- [3] Continental, 2016, `Up to 15 Percent Less Consumption – Continental Focuses on Automated Truck Convoys`, online: <https://www.continental.com/en/press/press-releases/automated-driving-platooning/> (03.05.2022)
- [4] NEON science, 2022, `How Does LiDAR Remote Sensing Work? Light Detection and Ranging` (videorecording), Sjedinjene Američke Države
- [5] Gerrits B. 2019, `An Agent-based Simulation Model for Truck Platoon Matching`, online: [https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-a-two-truck-platoon\\_fig1\\_333251364](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-a-two-truck-platoon_fig1_333251364) (Pristupljeno 10.04.2022.)
- [6] AUTOCRYPT, 2021, `Camera, Radar and LiDAR: A Comparison of the Three Types of Sensors and Their Limitations`, online: <https://autocrypt.io/camera-radar-lidar-comparison-three-types-of-sensors/> (16.02.2022.)
- [7] Peloton tech, online: <http://peloton-tech.com/how-it-works/> (Pristupljeno 06.03.2022.)
- [8] Tsugawa S., Jeschke S., Shladover S. 2016, `A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings`, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, p. 68 - 77
- [9] Sennder, 2019, `Truck platooning`, online: <https://www.sennder.com/ee/post/truck-platooning?lang=es> (29.03.2022.)
- [10] Driving tests, 2015, `How to Use Cruise Control: 7 Specific Things You Need to Know Well`, online: <https://driving-tests.org/beginner-drivers/how-to-use-cruise-control/>
- [11] Skill-Lync, 2021, *Cooperative Adaptive Cruise control for intelligent Vehicular flow*, (videorecording), Indija
- [12] Wang Z. et al. 2020, `A Survey on Cooperative Longitudinal Motion Control of Multiple Connected and Automated Vehicles`, *IEEE Intelignet transportation systems magazine*, vol. 12, no. 1, p. 4 - 24
- [13] Kia, 2022, `How does cruise control work?`, online: <https://www.kia.com/dm/discover-kia/ask/how-does-cruise-control-work.html> (08.02.2022.)
- [14] Wang J. et al 2019, `A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing`, *Sensors*, vol. 19, no. 334, p. 1-15
- [15] Tsugawa S. et al 2022, `Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications`, *IEEE Intelignet transportation systems magazine*, vol. 3, no. 3, p. 155 - 161
- [16] Avnet abacus, 2022, `Vehicle-to-vehicle (V2V) communication`, online: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/markets/automotive-and-transportation/automotive/communications-and-connectivity/v2v-communication/> (09.03.2022.)

- [17] Mahmood 2019., `Software-Defined Heterogeneous Vehicular Networking: The Architectural Design and Open Challenges` (Pristupljeno 21.03.2022.)
- [18] NHTSA, 2017, `What is V2V communication?`, online: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/vehicle-vehicle-communication> (15.04.2022.)
- [19] Qualcomm, 2020, `C-V2X delivers outstanding performance for automotive safety`, online: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/11/19/c-v2x-delivers-outstanding-performance-automotive-safety> (Pristupljeno 05.02.2022.)
- [20] Ghadially Z. Khan Z. 2020, *Intermediate: Vehicle to Everything (V2X) Introduction*, (videorecording), Ujedinjeno Kraljevstvo
- [21] Nardini G. et al 2018, `Cellular-V2X Communications for Platooning: Design and Evaluation`, *Sensors*, vol. 18, no. 1527, p. 1-22
- [22] Rauch A., Klanner F., Dietmayer K. 2011, `Analysis of V2X Communication Parameters for the Development of a Fusion Architecture for Cooperative Perception Systems`, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, p. 685-690
- [23] RF Wireless World, 2012, `Advantages of V2X Communication | disadvantages of V2X Communication`, online: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-V2X-Communication.html> (16.05.2022.)
- [24] T4IoT, 2021, `C-ITS V2X`, online: <https://tnet4iot.com/smart-iot-solutions/road/c-its-v2x/> (28.02.2022.)
- [25] NHTSA, 2015, `Vehicle-To-Vehicle Communication`, (videorecording), Sjedinjene Američke Države
- [26] Hawkings A. J. 2020, `The auto industry's fight with the FCC over 'vehicle-to-everything' communication is heating up`, The Verge, online: <https://www.theverge.com/2020/4/23/21233085/v2x-vehicle-to-everything-fcc-safety-spectrum-airwaves-wifi> (Pristupljeno 17.01.2022.)
- [27] Balen J. 2014, `Učinkovito rasprostiranje poruka u mrežama vozila zasnovano na njihovom položaju`, doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Osijek
- [28] Radman M. 2020, `Forenzička analiza informacijsko-komunikacijskih sustava vozila kao terminalnih uređaja`, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
- [29] BOSCH, 2008, `Characteristics of the front radar sensor`, online: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/front-radar-sensor/> (11.03.2022.)
- [30] COMPARE, 2022, `What is Vehicle-to-Vehicle (V2V) Communication All About?`, online: <https://www.compare.com/ways-to-save/vehicle/vehicle-communication> (04.05.2022.)
- [31] 3M, 2020, `What is Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communication and why do we need it?`, online: [https://www.3m.com/3M/en\\_US/road-safety-us/resources/road-transportation-safety-center-blog/full-story/~what-is-vehicle-to-infrastructure-v2i-communication-and-why-do-we-need-it/?storyid=021748d7-f48c-4cd8-8948-b7707f231795](https://www.3m.com/3M/en_US/road-safety-us/resources/road-transportation-safety-center-blog/full-story/~what-is-vehicle-to-infrastructure-v2i-communication-and-why-do-we-need-it/?storyid=021748d7-f48c-4cd8-8948-b7707f231795) (24.02.2022.)

- [32] Verizon connect, 2021, `What Is V2V Technology?: V2V vs V2I vs V2X Technology Systems`, online: <https://www.verizonconnect.com/resources/article/connected-vehicle-technology-v2v-v2i-v2x/> (21.03.2022.)
- [33] Domić I. 2021, `Sustavi autonomne vožnje u automobilima`, završni rad, Istarsko veleučilište, Pula
- [34] Evans I. 2014., `Vehicles To Infrastructure (V2I) Deployments`, FHWA V2I, online: <https://www.slideserve.com/indira-evans/vehicles-to-infrastructure-v2i-deployments> (Pristupljeno 01.04.2022.)
- [35] Dadić I., Ševrović M., Kos G. 2014, `Teorija prometnog toka`, Sveučilište u Zagrebu, Treće dopunjeno izdanje, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb
- [36] Kušić K. 2015, `Mogućnost primjene modela drugog reda modeliranja cestovne mreže`, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti završni rad
- [37] Anu M. 1997, `Introduction to modeling and simulation`, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, završni rad, Zagreb
- [38] Oletić A. 2015, `Simulacija proizvodnih sustava`, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [39] PTV GROUP, PTV Vissim, `Multimodal Traffic Simulation Software`, online: <https://www.myptv.com/en/mobility-software/ptv-vissim>
- [40] Aimsun, 2021, `C/ACC controller in Aimsun Next`, online: <https://www.aimsun.com/knowledge-base/c-acc-controller-in-aimsun-next/>
- [41] Zhao L., Sun J. 2013, `Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors under Connected-Vehicle Environment`, vol. 96, no. 2013, p. 914 – 924
- [42] Gebrewahid E., Jokhio Fareed A. 2010, `Experiments with Vehicle Platooning`, Škola za informatiku, računalstvo i elektrotehniku, Sveučilište Halmstad
- [43] Pedro F. Lima 2013, `Implementation and Analysis of Platoon Catch-Up Scenarios for Heavy Duty Vehicles`, Projekt magistarskog studija, Stockholm, Švedska
- [44] Englund C. et al. 2016, `The Grand Cooperative Driving Challenge 2016: Boosting the Introduction of Cooperative Automated Vehicles`, vol. 23, no. 4, p. 146 - 152
- [45] Bishop R. 2019, `The Three Streams of Truck Platooning Development`, online: <https://www.linkedin.com/pulse/three-streams-truck-platooning-development-richard-bishop>
- [46] EU comission, CORDIS 1996, `EU Freight Traffic Control`, online: <https://cordis.europa.eu/project/id/TR1009>
- [47] Bergenhem C. et al. 2012, `Overview of Platooning Systems`, *19th ITS World Congress*, Vienna, Austria, 22/26 October 2012
- [48] Tsugawa S., Kato S., Aoki K. 2011, `An Automated Truck Platoon for Energy Saving`, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, September 25-30, 2011. San Francisco, CA, USA

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Razine automatizacije.....	4
Tablica 2. Potrošnja goriva u postocima, mjerena tijekom izvođenja platooning eksperimenta .....	38
Tablica 3. Usporedba četiri Platoon projekata .....	41

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz Platoona koji se sastoji od dva kamiona, puta bežične mreže i LiDAR uređaja .....	7
Slika 2. RGB kamere, radar i LiDAR uređaj na vozilu, u ovom slučaju kao jedni od preduvjeta za ostvarivanje Platoona .....	8
Slika 3. Smanjeni aerodinamički otpor između dva kamiona kao posljedica smanjene udaljenosti između vozila u Platoonu .....	9
Slika 4. Potrebni preduvjeti za ostvarivanje u prometu: V2V komunikacijska tehnologija, V2I komunikacijska tehnologija te RSU .....	13
Slika 5. Podjela sustava bežičnih komunikacija među vozilima .....	14
Slika 6. Mogućnosti komunikacije vozila sa svime što ga okružuje zahvaljujući V2X komunikacijskoj tehnologiji .....	15
Slika 7. Prikaz V2V komunikacije u cestovnom prometu, točnije na prometnicama .....	17
Slika 8. Mogućnosti povezivanja pojedinih entiteta u prometu zahvaljujući V2I komunikacijskoj tehnologiji .....	21
Slika 9. Analiza ponašanja međusobno povezanih vozila u Platoonu .....	25
Slika 10. Scenarij povezivanja vozila sa već postojećim Platoonom na raskrižju sa prometnom signalizacijom .....	27
Slika 11. Scenarij grupiranja Platoona s vozilima koja imaju različito odredište .....	28
Slika 12. Prikaz scenarija na ne signaliziranom raskrižju sa nedovoljnom preglednošću ..	30
Slika 13. Proces interakcije spajanja dvaju Platoona .....	31
Slika 14. Scenarij koncepta raskrižja sa CACC vozilima i manualnim vozilima te virtualni scenarij .....	32
Slika 15. Rezultati simulacije kretanja kamiona pri brzini od 80 km/h s međusobnim razmakom od 4 metara .....	38
Slika 16. Rezultati simulacije kretanja kamiona pri brzini od 80 km/h s međusobnim razmakom od 4 metara .....	40