

Analiza primjene kooperativnog koncepta za optimizaciju prometne mreže

Mikulec, Erika

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:954167>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Erika Mikulec

**ANALIZA PRIMJENE KOOPERATIVNOG KONCEPTA
ZA OPTIMIZACIJU PROMETNE MREŽE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 23. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Cestovna telematika**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 7106

Pristupnik: **Erika Mikulec (0135254962)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Cestovni promet**

Zadatak: **Analiza primjene kooperativnog koncepta za optimizaciju prometne mreže**

Opis zadatka:

Kroz ovaj diplomski rad potrebno je definirati i prikazati komunikaciju vozila i infrastrukture, kao i njenu primjenu u prometnom sustavu. Također je potrebno prikazati i analizirati budući razvoj komunikacije vozila i infrastrukture, te prikazati vizualizaciju optimizacije prometne mreže, donosno prikazati komunikaciju vozila i infrastrukture proširenom stvarnošću.

Mentor:

**Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:**

doc. dr. sc. Miroslav Vujić

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**ANALIZA PRIMJENE KOOPERATIVNOG KONCEPTA ZA
OPTIMIZACIJU PROMETNE MREŽE**

**ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE COOPERATIVE
CONCEPT FOR THE OPTIMIZATION OF THE TRAFFIC NETWORK**

Mentor: doc. dr. sc. Miroslav Vujić

Student: Erika Mikulec

JMBAG: 0135254962

Zagreb, rujan 2023.

SAŽETAK

S obzirom da je prometna potražnja već dosegla visoku razinu, neprestano se istražuju nove strategije i rješenja kako bi se poboljšali prometni uvjeti i kvaliteta prometne mreže. Jedan od ključnih pristupa za unapređenje prometnog sustava su Inteligentni transportni sustavi (ITS) koji se temelje na informacijskim i komunikacijskim tehnologijama (ICT) za upravljanje i kontrolu prometa te općenito nadogradnju klasičnog prometnog sustava. Rastući razvoj telekomunikacijskih tehnologija omogućuje i međusobnu komunikaciju između vozila i infrastrukture kao i vozila i vozila stvarajući temelj za razvoj kooperativnih sustava. Ova integracija otvara vrata za daljnje unapređenje standarda sustava promjenjivog ograničenja brzine, uz uključivanje kooperativnih značajki. Središnji je cilj istraživanja analiza prednosti uključivanja infrastrukture u komunikaciju vozila i autonomnog upravljanja postojećeg sustava industrijskog okruženja. Studija demonstrira modeliranje kooperativnog koncepta te vizualizaciju proširenom svarnošću.

Ključne riječi: kooperativni sustavi, komunikacija vozila i infrastrukture, komunikacija vozila i vozila, industrija, 3D modeliranje, proširena stvarnost

SUMMARY

Considering that traffic demand has already reached a high level, new strategies and solutions are constantly being explored to improve traffic conditions and quality of the traffic network. One of the key approaches to enhancing the transportation system is Intelligent Transport Systems (ITS), which rely on information and communication technologies (ICT) for traffic management and control and generally upgrading the classic transport system. The growing development of telecommunications technologies enables intercommunication between vehicles and infrastructure, as well as vehicle-to-vehicle communication, thus creating cooperative systems. This integration opens the door for further improvement of variable speed limit system standards, incorporating cooperative features. The central goal of the research is to analyze the benefits of integrating infrastructure into vehicle communication and autonomous control of the existing industrial environment system. The study

demonstrates the modeling of the cooperative concept and its visualization using augmented reality.

Key words: cooperative systems, vehicle to infrastructure communication, vehicle to vehicle communication, industry, augmented reality (AR)

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. UVOD I PREGLED KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE	3
2.1. Kooperativni sustavi	3
2.1.1. Primjena kooperativnih koncepata.....	5
2.1.2. Prednosti kooperativnih sustava.....	8
2.1.3. Izazovi kooperativnih sustava.....	9
2.2. Komunikacija vozila i infrastrukture (V2I)	10
2.3. Komunikacija vozila i vozila (V2V).....	15
3. PRIMJENA KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE	18
3.1. Putno informiranje vozača.....	18
3.2. Upravljanje prometnim tokovima kontrolom ograničenja brzine	19
3.3. Kooperativna kontrola ograničenja brzine	23
3.3.1. Modeliranje kooperativnog sustava kontrole ograničenja brzine	26
3.3.2. Algoritam kontrole promjenjivog ograničenja brzine	27
4. ANALIZA BUDUĆEG RAZVOJA KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE	28
4.1. Tržište V2I tehnologije.....	29
4.2. Tržište jedinica u vozilu	31
4.3. Tržište jedinica uz cestu	33
4.4. Budućnost V2I komunikacije u industriji.....	34
4.4.1. Autonomna vozila	35
4.4.2. Truck platooning	36
5. VIZUALIZACIJA KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE U INDUSTRIJSKOM OKRUŽENJU PROŠIRENOM STVARNOŠĆU	42
5.1. Modeli u Blenderu	42
5.2. Modeli u Unity-u	43
5.3. Animacije u Unity-u	48
6. ZAKLJUČAK.....	58
LITERATURA	60

POPIS KRATICA	66
POPIS SLIKA	68
POPIS TABLICA.....	69
POPIS GRAFIKONA	69

1. UVOD

Područje prijevoza ljudi, roba i informacija prošlo je kroz velike promjene tijekom posljednjih nekoliko desetljeća. Povećana potražnja za putovanjima, zajedno s ograničenom infrastrukturom, doveli su do maksimalnog iskorištenja infrastrukturnog kapaciteta, a time i porasta broja prometnih nesreća. Nastavno na razvoj prometa kao gospodarske grane povećao se fokus na inteligentne transportne sustave (ITS) čiji razvoj prati napredak komunikacijskih tehnologija. U posljednje vrijeme kooperativni sustavi opisani su i razvijeni kao proširenje tradicionalnog ITS-a.

U ovom radu analizirani su kooperativni koncepti s naglaskom na komunikaciju između vozila i infrastrukture. Naslov rada je „Analiza primjene kooperativnog koncepta za optimizaciju prometne mreže“ i sastavljen je od šest cjelina, a to su:

1. Uvod
2. Uvod i pregled komunikacije vozila i infrastrukture
3. Primjena komunikacije vozila i infrastrukture
4. Analiza budućeg razvoja komunikacije vozila i infrastrukture
5. Vizualizacija komunikacije vozila i infrastrukture u industrijskom okruženju proširenom stvarnošću
6. Zaključak

U drugom poglavlju obrađena je tema kooperativnih sustava, njihovih prednosti i izazova te je pobliže objašnjena komunikacija vozila i infrastrukture i komunikacija vozila i vozila.

U trećem poglavlju istražena je najčešća primjena komunikacije vozila i infrastrukture, a to je putno informiranje vozača i kooperativna kontrola ograničenja brzine.

U četvrtom poglavlju analizirano je buduće tržište same komunikacije vozila i infrastrukture te njezinih komponenti: jedinica u vozilu i jedinica uz cestu.

U petom poglavlju prikazan je postupak izrade modela pametne luke proširenom stvarnošću. Prikazana je izrada pojedinačnih modela zgrada, tegljača, kontejnera i ostale opreme te je dan pregled postupka izrade navedenog projekta proširenom stvarnošću.

2. UVOD I PREGLED KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE

Kako bi se zadovoljile sve veće potrebe za sigurnijim i učinkovitijim prijevozom ljudi i roba potrebni su novi pogledi i pristupi prometnom sustavu. Vozila svakodnevne upotrebe počinju se dizajnirati s mogućnošću međusobne komunikacije i komunikacije s cestovnom infrastrukturom. Planiranje rute vozača, izbjegavanje incidenata i prometnih nesreća više ne ovise samo o vozaču već informacije o okolini, drugim vozilima i sudionicima u prometu omogućavaju poboljšanje uvjete vožnje što dovodi do poboljšane sigurnosti i učinkovitosti mobilnosti.

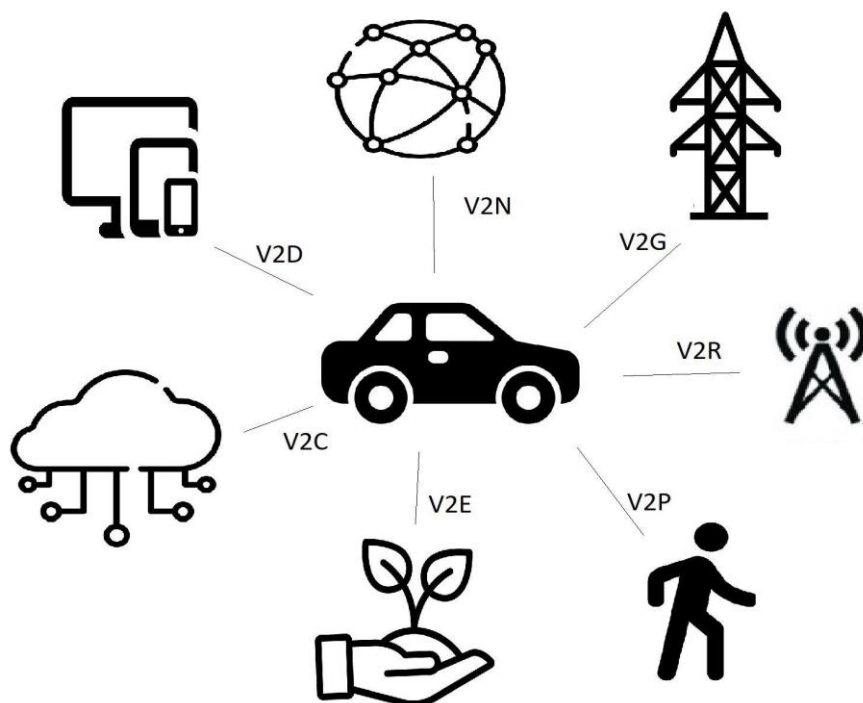
2.1. Kooperativni sustavi

Sustavi u kojima vozilo bežično komunicira s drugim vozilima, infrastrukturom te drugim korisnicima nazivaju se kooperativni sustavi primjenjivi u prometu i transportu. Kooperativni sustavi čine poseban pristup u suvremenom ITS-u te njihova tehnologija omogućuje dvosmjernu komunikaciju [1]:

- a) V2V - vozila s vozilom,
- b) V2I - vozilo s infrastrukturom,
- c) V2X - vozilo s ostalim korisnicima (npr. engl. *Vulnerable Road User*, VRU).

Inteligentni transportni sustavi (ITS) definirani su kao holistička, upravljачka i informacijsko-komunikacijska nadgradnja klasičnog prometnog sustava prometa i transporta kojim se postiže znatno poboljšanje performansi odvijanja prometa kroz učinkovitiji transport putnika i roba, poboljšanu sigurnost u prometu, udobnost i zaštita putnika, manja onečišćenja okoliša, itd. [2] S obzirom na sve navedene prednosti ITS-a, glavna prednost kooperativnih sustava je uključivanje različitih sustava u jednu cjelinu koja funkcionira sigurno i efikasno. Efikasnost se očituje kvalitetom informacija koje prolaze medijima te naglašava definiranje i izradu komunikacijske veze između sudionika prometnog sustava - vozila, vozača i infrastrukture. Osnovna ideja je da su vozila opremljena s upravljачkim jedinicama, usmjerivačima i antenama, stoga mogu dobivati informacije iz cestovne infrastrukture, obraditi te informacije i prikazati ih vozačima ili putnicima u javnom prijevozu.

Kooperativni sustavi imaju za cilj napraviti još jedan korak prema okruženju potpomognutom informacijama, savjetima i komunikacijom na cestama. Jedna je ideja natjerati vozila da 'pričaju jedno s drugim'. Ugrađena jedinica unutar vozila trebala bi moći slati i primati informacije od okolnih vozila uz korištenje već postojećih tehnologija i razvojem novih tehnologija. Ova vrsta komunikacije naziva se komunikacija vozilo-vozilo i često se skraćuje V2V komunikacija. Ovakav sustav komunikacije osigurava informacije o cesti, promjeni smjera kretanja ostalih vozila, informacije o stanju prometa na raskrižjima, izvješća o nesrećama, otkrivanje prepreka na prometnici itd. Druga vrsta komunikacije koja se može koristiti unutar kooperativnih sustava je komunikacija vozilo-infrastruktura i komunikacija infrastruktura-vozilo, često skraćeno V2I odnosno I2V komunikacija. Što znači da je vozila mogu slati i primati informacije od jedinica uz cestu. Osim bežične komunikacije između vozila i vozila s infrastrukturom postoji i V2X komunikacija, tj. sumirani izraz za komunikaciju između pješaka i vozila (V2P), vozila i uređaja (V2D), vozila i oblaka (V2C), vozila i mreže (V2N), vozila i okoliša (V2E), vozila i opreme uz cestu (V2R) itd. [3] Shematski prikaz V2X komunikacije prikazan je slikom 1.



Slika 1. V2X komunikacija

Kooperativni sustavi obećavajuća su informacijska i komunikacijska tehnologija (ICT- Information and Communication Technology) s ciljem pružanja učinkovitog prometnog sustava s većom razinom sigurnosti. Primjer testiranja i razvoja kooperativnih sustava je CVIS (engl. *Cooperative Vehicle – Infrastructure System*, CVIS), projekt podržan od strane Europske Komisije. [4]

Glavna ideja CVIS-a je unakrsna integracija različitih disciplinskih tehnologija, kao što su tehnologija senzora, informacijska tehnologija, tehnologija obrade velikih podataka, tehnologija umjetne inteligencije, itd., kako bi se ostvarila dinamička inteligentna percepcija V2V, V2I i dovršila koordinirana kontrola pješaka, vozila i infrastrukture, čime se poboljšava učinkovitost primjene prometnih informacija, smanjuju prometne gužve i smanjuju opasnosti za sigurnost prometa.

Kooperativni sustavi se razlikuju prema vrsti cestovnog okruženja te su u svakoj od kategorija primjeri razvijenih aplikacija i njihove prednosti na temelju različitih projekata koji se provode od 2006. godine.

2.1.1. Primjena kooperativnih koncepata

Kooperativni urbani koncepti

Cilj kooperativnih urbanih procesa je poboljšati učinkovitost korištenja urbane prometne mreže i kvalitetu informacija za vozače. Među sustavima koji se trenutno testiraju poboljšano je upravljanje raskrižjem gdje se vozilima koja se približavaju raskrižju daje preporučena brzina kako bi se osiguralo da će se upaliti zeleno svjetlo.

- a) Primjena profila brzine: sastoji se od brzine ili akceleracije/ deceleracije preporučene vozaču na temelju njegove trenutne brzine i stanja prometne mreže. Cilj aplikacije je ujednačavanje protoka prometa.

Prednosti vozila opremljenog s navedenim konceptom se iskazuju potrošnjom goriva i posljedično emisijom štetnih ispušnih plinova. S povećanjem upotrebe koncepta rastu i pogodnosti prometne mreže, npr. stvaranje dinamičnih zelenih valova koji poboljšavaju učinkovitost prometne mreže.

Fleksibilna primjena autobusne trake – namjenske trake ili autobusne trake za javni prijevoz poboljšavaju brzinu usluge javnog prijevoza. Glavni cilj ovog koncepta je povećati propusnu moć na pojedinim dionicama

ceste u urbanim sredinama osiguravanjem privremenog pristupa autobusnim trakama odabranim vozilima uz osiguranje nesmetanog prolaska vozila javnog prijevoza.

- b) Mikrorutiranje: kooperativni koncept za mikrorutiranje pruža savjete vozačima za urbano rutiranje koje definira centar za upravljanje prometom (ovisno o vremenskim uvjetima ili događanjima u gradu, kao što su nogometne utakmice itd.), kako bi izradio optimalnu, individualiziranu rutu uzimajući u obzir ostala vozila u mreži i povijesne podatke o prometu.

Prednosti: manja zaustavljanja i manja kašnjenja vozila na raskrižjima kao i kraće vrijeme putovanja od polazišta do odredišta. Nadalje, razina buke i emisije štetnih plinova su također smanjenje.

Koncept je najkorisniji na raskrižjima prometnice koja čini glavni arterijski pravac.

Kooperativni međugradski koncept

Kooperativni međugradski koncept se koristi na međugradskim autocestama za osiguranje suradnje između infrastrukture i vozila. Glavni cilj ovih uređaja je optimizirati protok prometa osiguravajući visoku razinu reakcije na prometne oscilacije i izvanrednih situacija.

- a) Planiranje prije putovanja i planiranje na putu: vozači mogu planirati putovanje preko međugradске mreže prema njihovoj potrebi, mjesta izvorišta i mjesta odredišta uzimajući u obzir trenutne i predviđajuće prometne uvjete.
- b) Besprijekorna usluga na putu: s praćenjem i preusmjeravanjem ako je potrebno. Servisni centar brine o zahtjevima vozača pružajući informacije ovisno o individualnim preferencijama vozača i karakteristikama vozača.
- c) Dostava podataka o vozilu centrima za kontrolu prometa: prikupljanje podataka o vozilu i planiranju poboljšava određivanje trenutnih i predviđenih prometnih uvjeta tako da se mogu kombinirati i koristiti kod planiranja putovanja.
- d) Savjeti za vožnju: vozaču se daju informacije o uvjetima za dio prometne mreže koji je neposredno ispred trenutne pozicije i putanje vozila.

Namjera je upozoriti vozače na sve promjene trenutnih prometnih uvjeta, npr. stanje na cesti, vremenski uvjeti, napredna obavijest o prometnim zagušenjima...

- e) Otkrivanje i upravljanje *Ghost Driver*-om¹: omogućuje otkrivanje *Ghost Driver*-a od strane jedinice uz cestu (RSU), vozila ili njihovih vozača.

Kooperativno upravljanje teretom

Glavni cilj sustava primijenjenog na gospodarska vozila je upravljanje informacijama o poziciji, vrsti tereta i odredištu tereta.

- a) Koncept upravljanja opasnim teretom: roba se neprestano može pratiti i osigurati prioritet na unaprijed odabranoj sigurnoj ruti.
- b) Upravljanje utovarnim prostorom i parkirališnom zonom: utovar i istovar na ulici su aktivnosti često znatno ometaju protok prometa pa aplikacija omogućuje lakšu upotrebu utovarnih mjesta u urbanim područjima. Na autocestama su parkirna mjesta za teška teretna vozila ograničena i to često uzrokuje probleme vozačima i upraviteljima voznog parka ako se vozači moraju odmoriti, ali ne mogu pronaći parkirno mjesto. Aplikacija parkirališnih zona omogućuje učinkovitije korištenje postojećih parkirnih mjesta.
- c) Kontrola pristupa: Osnovna ideja aplikacije za upravljanje kontrolom pristupa je praćenje vozila koja se približavaju osjetljivim zonama kako bi se omogućio/zabranio pristup, kao preventivna sigurnosna mjera za izbjegavanje nezgoda i kao alat za dinamičku kontrolu prometnih uvjeta u ograničenim područjima. Vozila imaju komunikaciju s operaterom ceste te on definira pravila povezana s određenim osjetljivim područjem.

Primjena CVIS-a u transportnoj industriji ima široke mogućnosti, uključujući kooperativni koncept primjenjiv za sigurnost prometa, učinkovitost prometa, upravljanje, informacijske usluge i druge. Primarni ciljevi su smanjenje prometnih nesreća pružanjem pomoći pri promjeni trake, kooperativnog upozoravanja na prednji sudar, upozoravanja na hitna vozila, upozoravanja o vožnji pogrešnom

¹ Ghost Driver: tzv. vozač duh je vozač koji vozi u krivom smjeru nasuprot prometnog toka na autocesti [5]

cestom i upozoravanja o prometnim uvjetima. Nadalje, poboljšanje protoka prometa i koordinacije vozila kroz upravljanje brzinom i pružanje lokalnih informacija i karata (kooperativna navigacija). [4]

2.1.2. Prednosti kooperativnih sustava

Kooperativni sustavi mogu doprinijeti boljem protoku prometa, poboljšati sigurnost te smanjiti štetan utjecaj na okoliš zahvaljujući razmjeni informacija između korisnika cestovne mreže o prometnim uvjetima. Posebno u urbanom kontekstu, moguće je davati savjete vozačima o odabiru rute prema lociranju prometnog zagušenja ili incidentne situacije na prometnici. Na taj način vozači ili korisnici sustava mijenjaju plan putovanja izbjegavajući pogoršanje prometnih uvjeta. Poboljšanje protoka prometa doprinosi smanjenju potrošnje goriva i zagađenja eliminiranjem stani-kreni vožnje i naglog kočenja, a u isto vrijeme jamče sigurniju vožnju. Kooperativni sustavi za prijevoz tereta i upravljanje voznim parkom mogu pomoći u povećanju sigurnosti zbog učinkovitijeg praćenja prijevoza opasne robe, ali i praćenjem dijagnostičkog statusa vozila. Istovremeno doprinose rješavanju problema vezanih uz parkirališne zone pomoću informacija o dostupnosti parkirališnih mjesta kao i popunjenosti same parkirališne površine. [6]

Davanja prioriteta vozilima hitnih službi putem kooperativnih sustava omogućuje hitnim vozilima brži prolazak kroz prometnu situaciju smanjujući vrijeme odaziva i brži dolazak na odredište. V2I komunikacija omogućuje hitnim vozilima slanje signala ili zahtjeva za prioritetom prema infrastrukturi, koja može prilagoditi prometne signale ili upravljati prometom kako bi olakšala brzo i sigurno prolazak hitnih vozila. [7]

Prikupljanje informacija o prometnoj situaciji na glavnoj cesti putem kooperativne komunikacije omogućuje prilagodbu semafora na prilaznim rampama kako bi se optimizirao protok prometa. Na temelju podataka o gustoći prometa, brzini vozila ili nekim drugim parametrima sustav ramp-meetering prilagođava trajanje faza na semaforima kako bi se održao optimalan protok na glavnom toku prometnice. Sustav funkcionira i bez semafora tako da se vozilima na rampama šalju informacije o preporučenoj brzine kako bi se smanjilo prometno zagušenje

prilikom uključivanja na glavnu prometnicu. Preporučena brzina se izračunava na temelju podataka o prometnom toku na glavnoj prometnici. [7]

2.1.3. Izazovi kooperativnih sustava

Iako kooperativni sustavi nude brojne prednosti, takve tehnologije nisu savršene. Kako bi mogli podržati rastući broj sudionika u prometnom sustavu i povećanu razmjenu podataka, kooperativni sustavi moraju biti skalabilni. Potreban je razvoj arhitekture i algoritama koji mogu efikasno upravljati velikim količinama podataka te osigurati da sustav ostane učinkovit i pouzdan čak i pri visokom opterećenju.

Privatnost podataka postaje sve važnija tema, a mnogi ljudi žele zadržati kontrolu nad informacijama koje se odnose na njihova vozila i njihove putne navike. U kontekstu kooperativnih sustava, razmjena informacija između vozila, infrastrukture i drugih sudionika prometa može uključivati osjetljive podatke, kao što su lokacija vozila, navike vožnje i druge osobne informacije. Stoga je važno postići ravnotežu između visoke sigurnosti i privatnosti ljudskih želja. Prikupljaju se određeni podaci kako bi se poboljšala funkcionalnost sustava i trebaju biti prikupljeni samo oni potrebni te korišteni samo u svrhu za koju su prikupljeni. Kako bi se zaštitila privatnost korisnika, važno je razmotriti načine za anonimizaciju prikupljenih podataka. Održavanje visoke razine privatnosti ključno je za povjerenje korisnika u sustavu.

Također, preciznost i pouzdanost informacija o položaju vozila, prometnim uvjetima i drugim relevantnim podacima ključni su za pravilno funkcioniranje kooperativnih sustava. Nažalost, sustav ne može uvijek primiti točnu informaciju o položaju te podzemni tuneli i neke zgrade mogu izazvati blokadu GPS signala. RSU-ovi su postavljeni duž cesta i obično imaju ograničen domet. To može rezultirati nepotpunim pokrivanjem određenih područja, posebno u ruralnim ili slabo naseljenim područjima. RSU prikuplja podatke o vozilima unutar područja koje pokriva. [8]

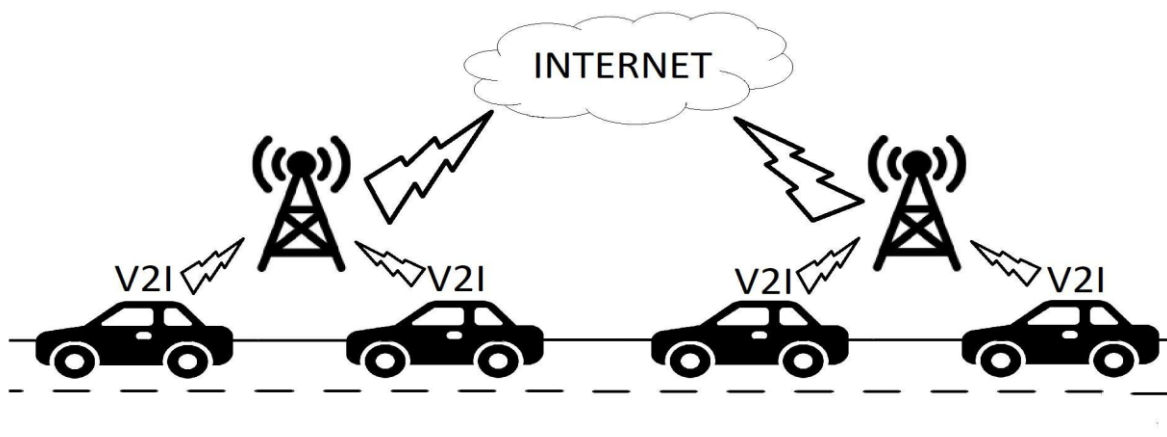
Poseban je izazov kontrola prometa u blizini raskrižja koja su među složenijim elementima prometnog sustava što ih čini najkontroliranijom prometnom infrastrukturom (prometni znakovi, semafori, pravila prednosti prolaska). Složenost

i sveobuhvatna regulacija uvjetuju da raskrižja često čine uska grla u prometnom sustavu kada prosječna brzina pada, a gustoća prometnog toka raste. Vozila opremljena komunikacijskom tehnologijom, bilo V2I, V2V ili V2X trebala bi koordinirati te postići zahtjev za kvalitetom usluge kao što je minimizacija ukupne potrošnje goriva (npr. usporavanje laganog vozila umjesto teškog teretnog ili kamiona). Iz perspektive kontrole, postizanje koordinacije među više agenata u sustavu predstavlja složen i teško rješiv problem kontrole. Iz komunikacijske perspektive, raskrižje odgovara gustoj, mobilnoj ad-hoc mreži, sa strogim zahtjevima latencije. Iz perspektive obrade signala, dobivanje informacija o stanju zahtijeva rad s mobilnom, vrlo složenom okolinom s ograničenom vidljivošću. Sve zajedno čini prometnu situaciju na raskrižju važnom te jasno odražava i odgovara kooperativnom inteligentnom transportnom sustavu te se smatra prikladnim i relevantnim za primjenu u tom kontekstu. [9]

2.2. Komunikacija vozila i infrastrukture (V2I)

Komunikacijski sustav između vozila i infrastrukture (V2I) omogućuje bežičnu razmjenu informacija između vozila i cestovne infrastrukture. Razmjena podataka se vrši putem dvosmjerne komunikacije za podršku sustavima kao što su prometni znakovi, semafori i ulična rasvjeta. [10]

Cilj ovog oblika komunikacije je osigurati sigurnost u različitim situacijama, kao što su loši vremenski uvjeti, neispravna rasvjeta, autoceste kako bi se izbjegli potencijalni sudari. Ova tehnologija upozorava vozača na sudar, zastoje, opasne zavoje i brzine. U sigurnom mrežnom sustavu, V2I tehnologija povezuje automobile, komunalne službe i pješake kako bi svim tvrtkama pružila informacije o vremenu, uvjetima na cestama, prometnim uvjetima, kašnjenjima u prometu, opasnim zavojima ili čak nesrećama. Ova mreža nudi nelinearni vizualni rad do 100 m i radi s velikom preciznošću u velikim prometnim gužvama, lošim vremenskim uvjetima i potencijalno opasnim uvjetima. Osim toga, V2I tehnologija se može koristiti za plaćanje automatskih kazni za parkiranje, poreza i tako dalje što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Opća arhitektura za komunikaciju između vozila i infrastrukture, [10]

Arhitektura sustava

Nekoliko V2I arhitektura može se pronaći u različitim istraživačkim radovima. Ali općenito se ti sustavi sastoje od istih ključnih komponenti, na temelju kojih se može definirati opći okvir.

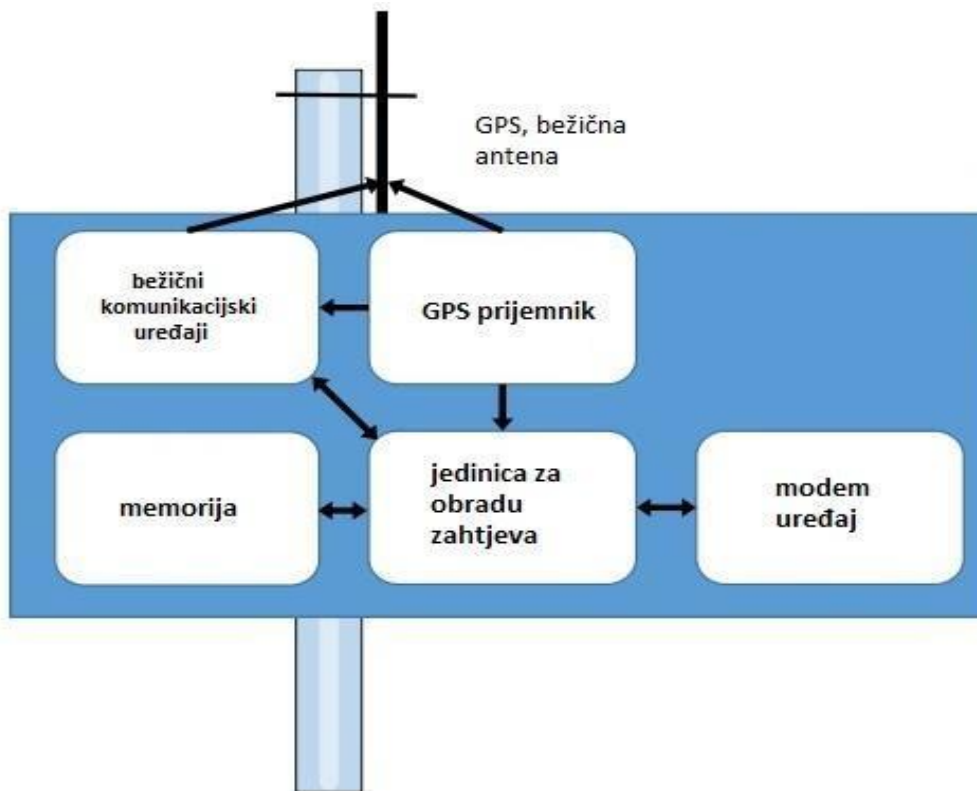
Minimalni V2I sustav trebao bi sadržavati sljedeće dijelove [11]:

- Jedinica ili oprema u vozilu , tj. ITS postaja u vozilu (OBU),
- Jedinica ili oprema uz cestu, tj. ITS postaja uz prometnicu (RSU),
- Siguran komunikacijski kanal.

ITS postaje uz prometnicu ili jedinica uz cestu (engl. *Roadside unit*, RSU) sa slike 3. su uređaji smješteni na raskrižjima ili duž prometnice, npr. benzinskim postajama pružajući sučelje vozilima unutar njihovog dometa. Sastoje se od radio primopredajnika, obično DRSC, aplikacijskog procesora i sučelja za V2I komunikaciju. Povezani s mrežom koji prikupljaju informacije o prometnom okruženju kao što su protok prometa, hitne situacije, prometna zagušenja, pješaci na raskrižjima, uvjeti na cesti (npr. sklizak kolnik) te ih šalju vozilima putem vehicle-to-infrastructure (V2I) komunikacije koji se kreću u njihovom okruženju.

Elementi prikazani na slici od kojih se sastoji RSU su [11]:

- a) bežični komunikacijski uređaji koji primaju i odašilju podatke putem antene,
- b) GPS prijemnik koji osigurava položaj i vrijeme,
- c) u memoriji se pohranjuju sigurnosni certifikati, podaci o aplikaciji i druge informacije,
- d) jedinica za obradu zahtjeva koja pokreće postupak obrade zahtjeva,
- e) modem uređaj koji prima i odašilje podatke s centralnim sustavom.



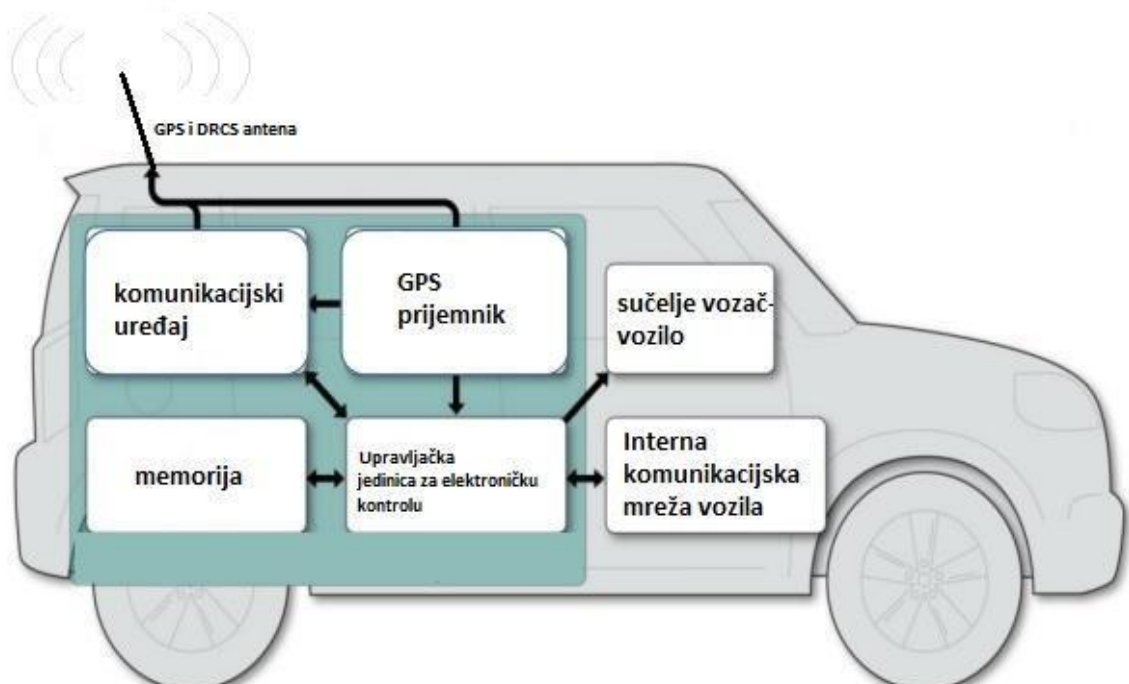
Slika 3. ITS postaja uz prometnicu, RSU, [11]

ITS postaje u vozilu (engl. *On-board unit*, OBU) sa slike 4. vrsta je mobilnih ili prijenosnih bežičnih pristupnih uređaja koji primaju informacije od cestovnih postaja, a podržavaju razmjenu informacija s cestovnim postajama i drugim postajama u vozilu te se njima može upravljati u pokretu. Sastoje se od radio primopredajnika, GPS sustava, aplikacijskog procesora, sučelja za sustave vozila te sučelja vozila i čovjeka (engl. *Human - machine interface*, HMI). Inteligentni sustav ugrađen u vozilo dobiva informacije o stanju vozila i informacije o okruženju

vozila (položaj, ubrzanje, kočenje, informacije o trasi ceste, stanju ceste, pješaci) prikupljene putem GPS-a, GIS-a, RADARA, video detekcije... ITS postaje analiziraju podatke i šalju ih drugim vozilima u obliku vehicle-to-vehicle (V2V) komunikacijom. Daljnjom kombinacijom tehnologije senzora, komunikacijske tehnologije u automobilu i tehnologije inteligentne kontrole, može se ostvariti inteligentna vožnja. [12]

Elementi prikazani na slici 4. od kojih se sastoji OBU su [11]:

- a) komunikacijski uređaj koji prima i šalje podatke putem antena,
- b) GPS prijemnik koji osigurava položaj i vrijeme,
- c) u memoriji se pohranjuju sigurnosni certifikati, podaci o aplikaciji i druge informacije,
- d) Upravljačka jedinica za elektroničku kontrolu koja pokreće sigurnosnu upravljačku jedinicu,
- e) Sučelje vozač-vozilo generira upozorenje izdano vozaču,
- f) Interna komunikacijska mreža vozila je postojeća mreža koja povezuje komponente.



Slika 4. ITS postaja u vozilu, OBU, [11]

S obzirom na to da V2I pruža širok raspon zaštite i mobilnosti prikupljanjem i dijeljenjem velikog broja podataka, igra veliku ulogu u podržavanju autonomne vožnje. Kada autonomno vozilo putuje cestom, ono neprestano prikuplja podatke o okolini pomoću senzora i drugih sustava. Međutim, ti senzori i sustavi ne mogu uvijek prikupiti sve potrebne informacije o okolini, poput stanja ceste ili prometnih gužvi. U takvim slučajevima, autonomna vozila mogu koristiti V2I tehnologiju za primanje informacija o okolini putem komunikacije s drugim vozilima, infrastrukturom i drugim izvorima. [12]

Sigurnost

Kooperativni sustavi se često razvijaju unutar otvorenih platformi gdje svatko s osnovnim znanjem ima mogućnost dodavanja aplikacija. Prednost otvorenih platforma je da se cilj interoperabilnosti ubrzava dok različiti dionici jednostavno dodaju aplikacije u sustav. S obzirom da je kod otvorenih sustava izazovno održavati određenu razinu sigurnosti i privatnosti, potrebna su rješenja za zaštitu korisnika i proizvođača. [3]

Komunikacija vozila mora biti osigurana u svim situacijama zbog mogućih nedopuštenih napada na vozila i njihovih platforma za osjet, obradu i komunikaciju. Svako računalo koje pokreće krivotvorenu verziju skupa komunikacijskih protokola vozila predstavlja prijetnju za mrežu vozila i rad transportnog sustava. Sigurnost sustava je ključna, inače takvi sustavi mogu potaknuti protudruštvene i kriminalne aktivnosti koje bi mogle narušiti prednosti korištenja istih. [10]

Komunikacija

Postoji nekoliko tehnologija bežične komunikacije koje se mogu koristiti u mrežama vozila kao uređaji kratkog dometa kao što je Bluetooth, Wi-Fi i namjenska komunikacija kratkog dometa (DSRC - Dedicated Short Range Communication) te uređaji dugog dometa kao što su mobilne mreže, satelitske usluge i digitalne radijske mreže.

Bluetooth je jednostavna, sigurna i gotovo posvuda dostupna bežična komunikacijska tehnologija čiji je cilj zamijeniti kabele koji povezuju uređaje s visokom razinom zaštite. Takozvano uparivanje je kada se dva uređaja koji imaju

omogućen Bluetooth povežu jedan s drugim. Struktura Bluetooth tehnologije i široka primjena omogućuje svim Bluetooth aktiviranim uređajima da se povežu s obližnjim Bluetooth uređajima u gotovo svim dijelovima svijeta. Automatizirana implementacija Bluetooth tehnologije pokrenuta je primjenom Hands Free profila za mobilne telefone u automobilima. [10]

Wi-Fi, tj. mrežna bežična lokalna mreža (WLAN) temeljena na standardima Instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (IEEE) 802.11. Wi-Fi mreže se već koriste za komunikaciju s parkiranim vozilima, npr. za ažuriranje softvera kao što to čini Tesla dok za korištenje javnog Wi-Fi-ja za vozila u pokretu postoji još niz istraživačkih projekata. Stvarna implementacija je izazovna zbog ograničenog radijskog dometa i potrebnog procesa povezivanja jer je vrijeme tijekom kojeg vozilo u pokretu može koristiti Wi-Fi mrežu često je vrlo kratko. Također, zbog nenadzirane prirode postavljanja, performanse se mogu dramatično razlikovati među mrežama i često su loše. Konačno, Wi-Fi sigurnost može dodatno usporiti povezivanje, a potencijalno čak i spriječiti klijente da koriste veliki dio mreža. [13]

DSRC - Dedicated Short Range Communication je jednosmjerna ili dvosmjerna usluga bežičnih podataka kratkog do srednjeg dometa, posebno dizajnirana za automobilske aplikacije.

Radio kratkog dometa je starija tehnologija, koja je široko rasprostranjena u vozilima javnog prijevoza. Instalirani su s radio odašiljačem kratkog dometa koji radi na nižem ISM pojasu (kao što je 433 ili 868 MHz). Može odašiljati identifikator koji može primiti signalni svjetionik sustava kontrole prometa i tako vozila javnog prijevoza mogu imati prioritet na raskrižjima ili stajalištima. [10]

2.3. Komunikacija vozila i vozila (V2V)

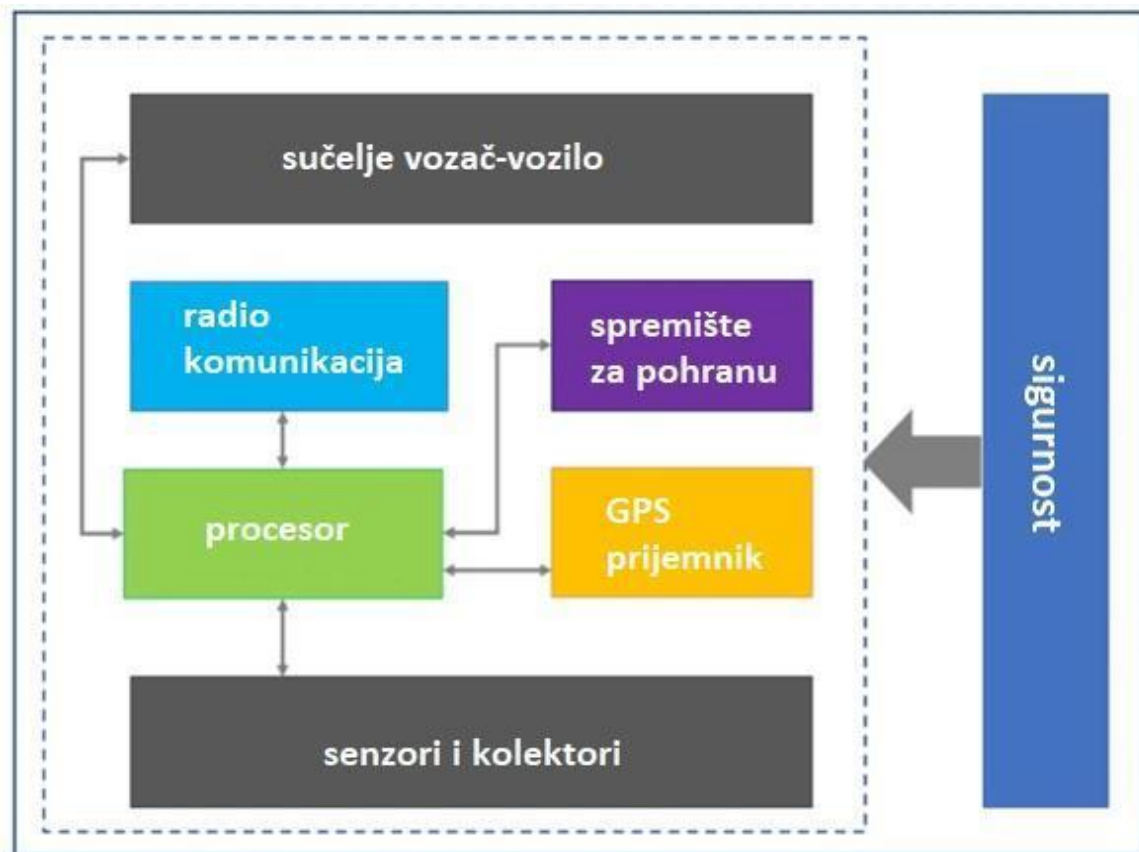
Komunikacija vozila i vozila je bežična ad hoc² mreža (engl. *vehicular ad hoc networks*, VANET) za vozila koja omogućuje razmjenu informacija i podataka između vozila u prometnom toku. V2V komunikacija koristi jedinice na vozilu za radio komunikaciju kratkog dometa za prijenos informacija o brzini vozila, smjeru kretanja, statusu kočnica i dr. Poruke i razmjena informacija poboljšavaju

² Ad hoc (lat.: za to), upravo za to, s tom svrhom, s određenom namjerom, za tu (posebnu) priliku [14]

učinkovitost prometa i izbjegavanje sudara, što doprinosi povećanju sigurnosti na cestama i smanjenju prometnih zagušenja. Vozila unutar raspona prijenosa mogu primiti informacije o događajima kao što su nesreće ili iznenadna zaustavljanja ispred i poslati signal vozačima unutar raspona prijenosa, u obliku upozorenja kako bi mogli usporiti prema potrebi. Zabrinutost je presretanje i modificiranje poruka prije nego što stignu do odredišta. U VANET-u ključno je osigurati informacije od zlorporabe, jer je to bežično komunikacijsko okruženje koje je otvoreno raznim vrstama vanjskih prijetnji. Neki od sigurnosnih zahtjeva za VANET uključuju autentifikaciju korisnika, osiguranje integriteta podataka, povjerljivost, skalabilnost, očuvanje privatnosti, zaštitu podataka, neoporicanje i mobilnost. Siguran V2V sustav sadrži tri glavne komponente: sigurnosne vjerodajnice ili certifikate, autentifikaciju putem važećih certifikata i razmjenu novih certifikata kako bi se omogućila šifrirana komunikacija. [15]

V2V okruženje sastoji se od vozila, od kojih je svako opremljeno jedinicom na vozilu (OBU). Ova jedinica emitira različite vrste podataka (kao što su položaj vozila, brzina i smjer), a također prima slične podatke od drugih vozila.

Slika 5. prikazuje internu arhitekturu V2V čvora (vozila) u V2V okruženju. Senzori i kolektori prikupljaju podatke važne za sigurnost, prometne informacije i infotainment, a izravno su povezani s procesorom i komponentom za donošenje odluka. Procesor je jezgra sustava koja prima prikupljene podatke s različitih uređaja, analizira prikupljene informacije i filtrira podatke kako bi se izbjeglo širenje nevažnih informacija. Te se informacije zatim koriste za donošenje najboljih odluka i smanjenje mrežnog prometa. Spremište za pohranu pohranjuje relevantne informacije o upravljačkom programu i aplikacijama kao što su sigurnosni certifikati, podaci o aplikacijama i druge informacije. GPS prijemnik pruža informacije poput lokacije vozila. Također se koristi za sinkronizaciju vremena radijske komunikacije svakog OBU-a vozila. Radio komunikacije je komponenta koja se koristi za razmjenu podataka s drugim vozilima putem antena. Sučelje je komponenta u izravnom kontaktu s vozačem odgovorno za obavještanje i upozorenje vozača. Sigurnost je kritična komponenta koja implementira sigurnosne funkcije i mehanizme koje koriste sve komponente u sustavu, a mora se razmatrati na razini uređaja, mreže i aplikacije. [15]



Slika 5. Interna arhitektura V2V čvora (vozila) u V2V okruženju, [15]

V2V komunikacija koristi bežični protokol sličan Wi-Fi-ju već ranije spomenut DSRC, koji u kombinaciji s tehnologijom globalnog sustava za pozicioniranje (GPS) pruža V2V komunikaciju koja nudi pogled od 360° na slično opremljeno vozilo unutar njegovog komunikacijskog dometa. Osim informacija o lokaciji vozila, brzinu, položaj, ubrzanje i smjer vozila, prenose se i informacije o upravljanju vozilom kao što su stanje mjenjača, status kočnica, kut upravljača i povijest putanje vozila i predviđanje putanje. [16]

3. PRIMJENA KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE

Cilj prometne mobilnosti je održavanje gustoće prometa na prometnicama blago ispod kritične razine kako bi se postigla maksimalna učinkovitost, no povećanjem gustoće prometa, protok se smanjuje i stvara se prometno zagušenje. Prometna zagušenja nose sa sobom neizravne troškove u vidu vremena koje putnici gube, zagađenjem okoliša i brojem nesreća. Izgradnja dodatne cestovne infrastrukture jedan je od načina prilagođavanja prometne mreže stalnom porastu prometne potražnje. Međutim, proširenje infrastrukture prometnica nije uvijek rješenje kao što dokazuje teorija inducirane prometne potražnje, gdje će povećanje kapaciteta izazvati dodatnu prometnu potražnju. Ovo je poznato kao Braessov paradoks. [17] Prihvatljiviji način optimizacije prometne mreže je upotreba tehnologija inteligentnih transportnih sustava te najčešća za upravljanje i kontrolu prometnih tokova na prometnicama je putno informiranje vozača i strategija kontrole ograničenja brzine.

3.1. Putno informiranje vozača

Putno informiranje vozača (engl. *On-Trip Driver Information*, ODI) sastoji se od usluga poput predputnog informiranja, putne informacije vozaču i putniku, putne informacije u javnom prijevozu, osobne informacijske usluge, izbor rute i navigacija. Cilj putnog informiranja je pružiti stvarnovremenske informacije o putovanju, procjenu vremena putovanja ovisno o postojećim uvjetima, raspoloživim parkirnim mjestima, prometnim nezgodama itd. Svrha usluge ODI je pružiti kvalitetnu informaciju vozaču (i putnicima) o prometnim uvjetima tijekom put. Koristeći te informacije, vozač ili putnik u vozilu treba donijeti odgovarajuće odluke o ruti ili promjeni moda prijevoza tako da ostavi osobni automobil na parkiralištu i nastavi javnim prijevozom. [18]

Putne informacije vozaču u pravilu se odnose na [18]:

1. uvjete na prometnici,
2. nezgode i nesreće na cesti,
3. posebne događaje (utakmice, štrajk i sl.) koji utječu na odvijanje prometa,
4. nastale promjene nakon što su dane predputne informacije,

5. raspoloživa parkirna mjesta nakon kojih se treba nastaviti putovanje javnim prijevozom,
6. alternativne rute i modove na mjestima njihova sučeljavanja,
7. atraktivna turistička ili zabavna događanja.

Dominantne tehnologije kojima su realizirani postojeći sustavi putnih informacija vozača u Europi su:

- I. Promjenjivi prometni znakovi: Znakovi s promjenjivim porukama elektronički su znakovi uz cestu koji se koriste za postavljanje informativnih poruka za putnike kako bi se vozači informirali o nezgodama, vremenu putovanja, zaobilaznicama, posebnim događajima i drugim korisnim uvjetima na cesti ili putnim informacijama. [19]
- II. RDS-TMC tehnologija (engl. *Radio Data System - Traffic Message Channel*): europski je standard za uslugu prometnih informacija neovisnu o jeziku. Usluga se temelji na zajedničkom europskom popisu kodova poruka i standardiziranom sustavu za lociranje poruka. [20]
- III. GSM/GPRS/UMTS/5G (engl. *Global System for Mobiles, GSM; General Packet Radio Service, GPRS; Universal Mobile Telecommunications System, UTM*): paketni radioprijenos. [18]
- IV. Osobni digitalni pomoćnici (engl. *Personal Digital Assistant, PDA*) spojeni na mobilnu mrežu. [18]

Sustavi za navođenje i navigaciju, u vozilima kao i na mobilnim uređajima, optimizirani su za potrebe vozača automobila i ne uzimaju u obzir druga prijevozna sredstva ili intermodalne informacije. U tu svrhu bila bi potrebna integracija mrežnih podataka za načine prijevoza u jednu multimodalnu referentnu mrežu i definiranje intermodalnih prijenosnih točaka. To znači da do sada nije dostupna integrirana i kontinuirana putnoinformacijska podrška za intermodalna putovanja.

3.2. Upravljanje prometnim tokovima kontrolom ograničenja brzine

Varijabilno ograničenje brzine (engl. *Variable Speed Limit Control - VLSC*) je ITS rješenje koje na temelju dobivenih real-time podataka automatski prilagođava ograničenje brzine glavnog prometnog toka. VLSC ima zadaću harmonizirati prometni tok homogenizacijom brzina vozila. Na temelju podataka o prometnoj

situaciji putem detektora na kolniku mijenja se dopuštena brzina kretanja vozila pomoću promjenjivih prometnih znakova. Položaj detektora na kolniku je prikazan slikom 6. Brzina se prilagođava na temelju prikupljenih informacija o gustoći i brzini prometnog toka te meteorološkim podacima. Prilagodba brzine je postupna. [21]

Samostalni VSLC portal se često koristi za smanjenje brzine na jednom



Slika 6. Položaj detektora na kolniku, [21]

specifičnom mjestu, npr. radovi na cesti, raskrižja, ceste s ograničenom vidljivošću te vršni satovi. Koriste se i na dionicama cesta gdje specifični vremenski uvjeti mogu dovesti do opasnih situacija. Primjer su dionice cesta na mostovima gdje postoji veliki rizik za pothlađivanje na temperaturama oko točke smrzavanja. Također se primjenjuju za smanjivanje brzine u zagušenom prometnom toku gdje su vjerojatnosti za nastanak prometne nesreće veće. Glavni cilj je smanjenje brzine u prometnom toku s velikom gustoćom prometa iz sigurnosnih razloga. Većinom se najveće gustoće prometa pojavljuju u vršnim satima, tj. karakterističnim satima najvećeg prometnog opterećenja gdje jedan samostalni VSLC portal nije dovoljan te se tada međusobno povezuje više portala putem upravljačkog algoritma. Algoritam se koristi za odlučivanje o ograničenjima brzine koja će se pojavljivati na portalima. [22]

Odgovarajuće poruke o smanjenom ograničenju brzine obično se prikazuju svaki kilometar (Australija, Nizozemska, Ujedinjeno Kraljevstvo), svaka dva kilometra (New Jersey, Washington, Njemačka) ili dva znaka po kilometru (Finska) prije same prometne situacije zbog koje se postavlja ograničenje brzine. Promjenjivi

znakovi s ograničenjem brzine se najčešće postavljaju iznad prometnice što poboljšava vidljivost samih znakova u odnosu na statične uz prometnicu.

Implementacija sustava promjenjivog ograničenja brzine obično se razmatra kako bi se ispunila jedna ili više od sljedećih svrha [22]:

1. Rano upozorenje vozačima na opasne uvjete na cesti i malu brzinu prometnog toka,
2. Utjecaj na ponašanje i povećanje motivacije vozača za poštovanje postavljenog ograničenja brzine,
3. Smanjenje rizika od sudara i poboljšanje sigurnost u prometu;
4. Stabilizacija i harmonizacija prometnog toka.

Primjena sustava varijabilnog ograničenja brzine ovisi o odabiru utjecaja na prometni tok i to su [22]:

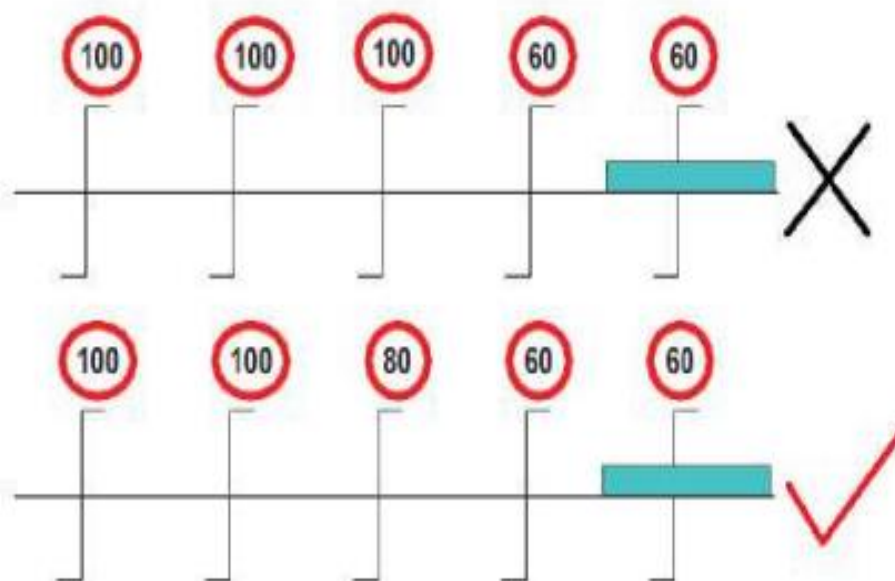
- 1) harmonizacija prometnog toka,
- 2) sprječavanje nestabilnih prometnih uvjeta (engl. *traffic breakdowns*),
- 3) stabilizacija prometnog toka u slučaju loših vremenskih uvjeta,
- 4) ograničenje brzine na raskrižjima.

Harmonizacija prometnog toka

Harmonizacija prometnog toka je smanjenje razlike brzine između vozila u prometnom toku. Omogućava se ravnomjeran i stabilan protok u svim prometnim trakama te se stvara uniforman i prihvatljiv interval slijeđenja. Ovaj pristup koristi ograničenja brzine koja su iznad kritične brzine, tj. brzine koja odgovara maksimalnom kapacitetu tako da se ne ograničava protok prometa. Pravilno smanjivanje brzine za harmonizaciju prometnog toka prikazano je na slici 7.

Učinci pristupa su [21]:

- smanjenje prosječne brzine i povećanje gustoće,
- sigurniji i stabilniji prometni tok,
- propusnost ostaje ista,
- mogućnost odgode nastanka prometnog zagušenja, no ne može eliminirati nastanaka šok-vala.



Slika 7. Smanjivanje brzine za harmonizaciju prometnog toka, [21]

Ovakav pristup promiče veću svijest vozača o njihovim okolinama i potiče skladnije ponašanje u prometu. Takđer, strategija može rezultirati manjim emisijama štetnih plinova jer se smanjuje potreba za čestim ubrzanjima, što doprinosi i ekološki održivijem prometnom sustavu.

Sprječavanje nestabilnih prometnih uvjeta

Sprječavanje nestabilnih prometnih uvjeta, tj. prometnih slomova (engl. *traffic breakdowns*) više se fokusira na sprječavanje nastanka zasićenih prometnih tokova. To se postiže dopuštanjem ograničenja brzine koja su niža od kritične brzine kako bi se ograničio tok, tj. priljev prometa u područja uskih grla (engl. *bottleneck areas*). Ako se spriječe nestabilni prometni uvjeti, može se postići povećanje ukupne protočnosti. [23]

Stabilizacija prometnog toka u slučaju loših vremenskih uvjeta

Postupno smanjivanje ograničenja brzine gdje su nepovoljni vremenski uvjeti (vidljivost, sklizak kolnik, itd.) utjecajan faktor na sigurnost prometnice.

Pretežno se koristi automatska kontrola, uz mogućnost ručne prilagodbe operatera tako da se prilikom pogoršanja vremenskih uvjeta do kritične točke

smanjuje ograničenje brzine na primjerenu brzinu kako bi se smanjila mogućnost incidentnih situacija. Kontrola ograničenja brzine zasnovana na vremenskim uvjetima djeluje preventivno. [23]

U Francuskoj vrijedi generalno smanjenje brzine tijekom loših vremenskih uvjeta kao što su kiša i snijeg i to [24]:

- Autoceste: 130 km/h → 110 km/h,
- Lokalne ceste: 90 km/h → 80 km/h,
- U slučaju magle kada je vidljivost manja od 50m → 50 km/h,
- Uobičajeno privremeno smanjenje za vrijeme velikih vrućina za 20-30 km/h.

U Finskoj i Švedskoj postoje različita ograničenja za zimsko razdoblje [24]:

- Autoceste: 120 km/h → 100 km/h,
- Lokalne ceste: 100 km/h → 80 km/h.

Ograničenje brzine na raskrižjima

Primjena ograničenja brzine pred samo raskrižje, posebno nesemaforizirano. Većinom sustav korišten uz sustav informiranja putnika čime se povećava pažnja vozača. Ograničenje brzine putem podataka dobivenih sa senzora postavljenih na sporednim privozima raskrižja te na lijevom glavnom privozu. Ako vozila prilaze raskrižju sa sporednih privoza, brzina na glavnom toku se postupno smanjuje, a vozači se informiraju o prilasku raskrižju sa smanjenom sigurnošću. [21]

3.3. Kooperativna kontrola ograničenja brzine

Kooperativna kontrola ograničenja brzine ili tzv. kooperativni SLC (engl. *cooperative speed limit control, C-SLC*) je nadogradnja postojećeg sustava kontrole ograničenja brzine omogućavanjem komunikacije između vozila i infrastrukture. Kada se razmatra postojeći SLC, informacije o promjeni ograničenja brzine prikazuju se putem promjenjivih poruka na portalima, a kada se uzima u obzir kooperativni SLC, informacije se šalju vozilima putem jedinica uz cestu. Kao što je već ranije spomenuto, prikupljaju se podaci o pojedinačnom vozilu od senzora u vozilu (OBU) za procjenu stanja u prometu te ti podaci, u usporedbi s podacima dobivenih od jedinica uz cestu (RSU), imaju veću točnost i finiju prostorno-vremensku rezoluciju. Kada se na temelju podataka od strane kontrolora prometa

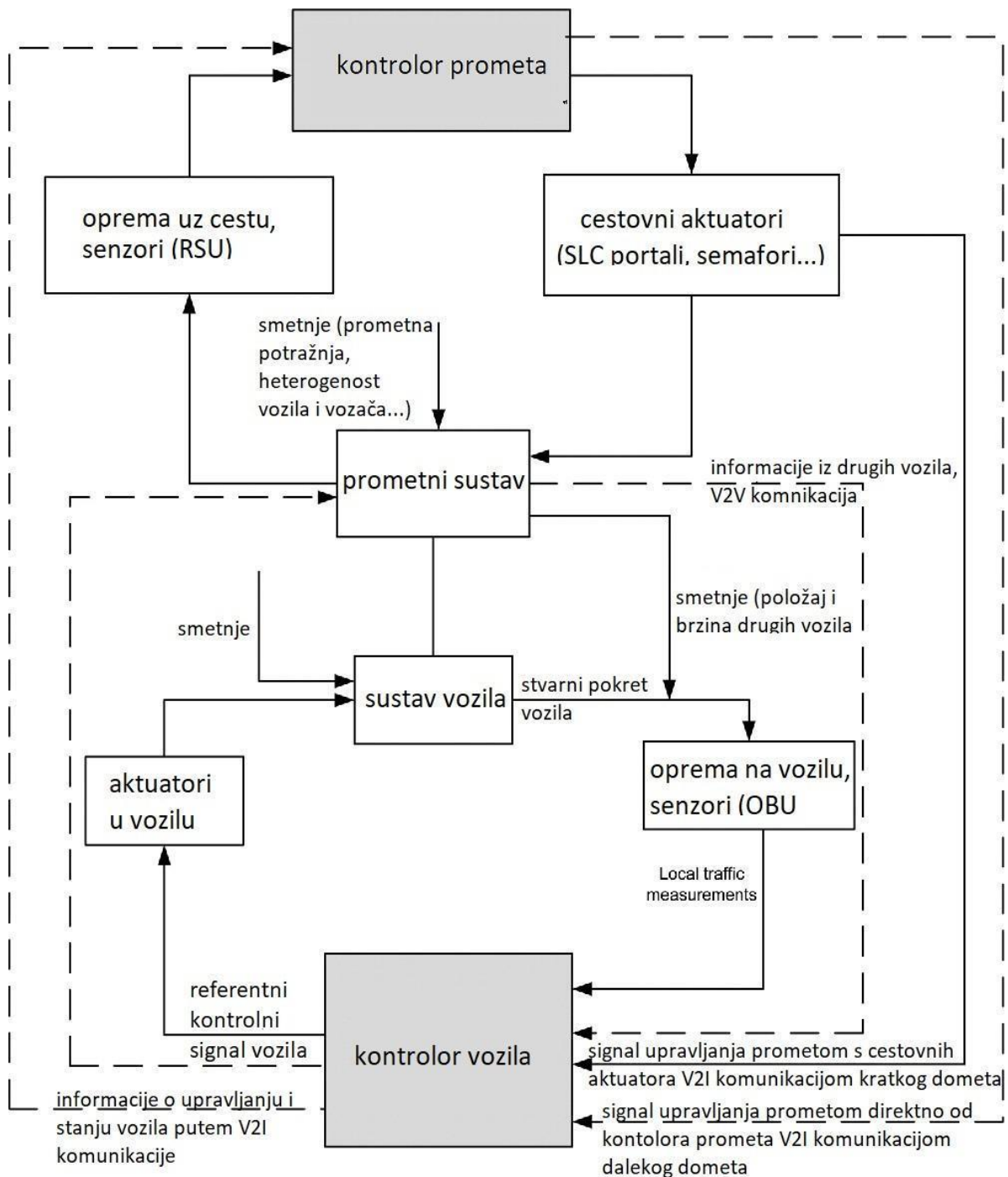
uspostavi kontrola prometa, u ovom slučaju ograničenje brzine, signali upravljanja prometom se prenose i izvršavaju putem cestovnih aktuatora, tj. portala za ograničavanje brzine ili se šalju izravno u vozila. Kako se vozila u mreži kreću na temelju lokalnih interakcija i signala kontrole prometa, stanje prometa na prometnici se mijenja, a kontrola stanja prometa ulazi u sljedeći kontrolni ciklus. [25]

Na nižoj razini, kontrolor vozila (npr. praćenje vozila, tj. engl. *car-following controller*) procjenjuje lokalnu situaciju oko vozila na temelju mjerenja ugrađenih senzora te koristi naredbe od kontrolora prometa za izračunavanje referentnih kontrolnih signala, kao što je ubrzanje. Upravljanje vozilom odvija putem sustava koji generira referentni signal, a koji se zatim prenosi na aktuatore vozila. Shematski prikaz procesa prikazan je na slici 8.

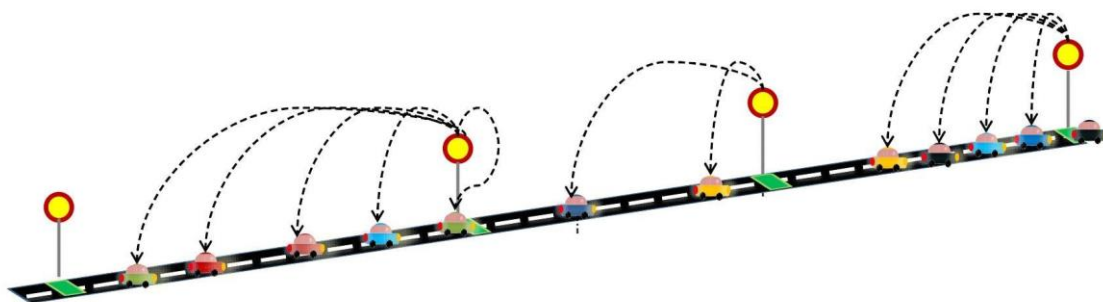
Brzina ograničenja dana vozilima izračunava se na temelju udaljenosti vozila od nove brzine ograničenja, trenutne brzine i referentne brzine. Kada vozila dosegnu novu brzinu ograničenja, dana im je preporuka za brzinu u unaprijed određenim vremenskim intervalima koji rezultiraju glatkim usporavanjem/ubrzanjem prema novim ograničenjima brzine.

Razlike između postojećeg sustava kontrole ograničenja brzine i nadogradnje, tj. kooperativnog su sljedeće [25]:

- I. kod kooperativnih sustava informaciju o promjeni brzine ograničenja vozilo prima prije nego što vozač može vidjeti fizički portal s ograničenjem brzine, tj. vozilo ima mogućnost ranije prilagodbe promjenama ograničenja,
- II. kooperativnim sustavima se vozilima daje individualna brzina ograničenja određena njihovom trenutnom brzinom i položajem,
- III. pretpostavlja se da je kooperativni SLC implementiran kao autonomni sustav upravljanja, tj. nije potreban nikakav odgovor vozača za prilagođavanje brzine onoj ograničenoj nego se postiže integracijom sustava kooperativnog SLC-a u tempomat, tzv. engl. *cruise control*.



Slika 8. Shematski prikaz procesa kooperativne kontrole ograničenja brzine, [25]



Slika 9. Princip rada kooperativne kontrolne ograničenja brzine, [3]

Ilustracijom je prikazan način rada kooperativnog SLC-a. Strelice pokazuju kako se informacije o promjenjivom ograničenju brzine šalju vozilima.

3.3.1. Modeliranje kooperativnog sustava kontrole ograničenja brzine

Za kooperativni SLC, promjenjiva ograničenja brzine koriste se kao referenca brzine za izračune pojedinačnih brzina koje su dane vozilima u određenim vremenskim trenucima. Pretpostavlja se da vozila primaju ažurirane informacije o ograničenju brzine putem komunikacije s jedinicama uz cestu (RSU) tijekom cijelog dijela ceste između uzastopnih SLC znakova. Individualna ograničenja brzine koje sustav daje vozilima izračunavaju se na temelju jednadžbe gibanja, tj. ubrzanja potrebnog za postizanje zadanog ograničenja brzine nakon unaprijed definirane udaljenosti uzimajući u obzir trenutnu brzinu vozila. Prvo se određuje konstantno ubrzanje potrebno za prilagodbu zadanom ograničenju brzine na mjestu sljedećeg SLC znaka pomoću formule 3.1.,

$$a_{t,i} = \frac{v_{t,j}^2 - u_{t,i}^2}{2 * s_{t,i,j}}, \quad [3.1]$$

gdje je $v_{t,j}$ ograničenje brzine dobiveno iz promjenjivog znaka ograničenja brzine j , koji se nalazi neposredno ispred vozila u trenutku t . $u_{t,i}$ je trenutna brzina vozila u trenutku t , a $s_{t,i,j}$ je udaljenost između vozila i i promjenjivog znaka ograničenja brzine j . Ubrzanje dano jednadžbom 3.1. koristi se određivanje pojedinačne brzine $w_{t,i}$ izračunate na temelju položaja i brzine pojedinačnih vozila,

$$w_{t,i} = u_{t,i} + a_{t,i} * T, \quad [3.2]$$

gdje je T vremenski interval između ažuriranja pojedinačne brzine u C-SLC sustavu. Kako bi se spriječile male brzine, pojedinačne brzine dodijeljene vozilima nikad nisu ispod trenutnog ograničenja promjenjive brzine. Slično tome, ni brzine iznad maksimalne dopuštene na cesti se ne dodjeljuju vozilima. [3]

3.3.2. Algoritam kontrole promjenjivog ograničenja brzine

Postoji nekoliko algoritama kontrole promjenjivog ograničenja brzine koji se koriste na autocestama i uglavnom se temelje na varijablama popunjenosti, brzine i volumena te su u upravljačkom algoritmu definirane kritične vrijednosti pri kojima se aktivira SLC sustav. Kako bi se smanjilo širenje šok valova, željena brzina se smanjuje uzvodno na kritične vrijednosti. Algoritmi temeljeni na prosječnoj popunjenosti implementirani su na I-4 u Orlando u Floridi dok su algoritmi temeljeni na protoku implementirani na autocesti M25 u Engleskoj i na autocesti E6 u Mölndalu, Švedska. [26]

Glavni je cilj SLC algoritama tzv. automatsko otkrivanje incidentnih situacija, tj. otkrivanje incidenata i postavljanje uzastopnog smanjenja brzine pri približavanju mjestu incidenta. Kooperativni SLC sustav smanjuje uključenost vozača izravnim prenošenjem obavijesti vozilu. Algoritam odlučivanja o ograničenju brzine uzima u obzir srednju vrijednost ubrzanja. [3] Srednja brzina na detektorima izračunava se korištenjem harmonijske srednje brzine koju daje:

$$\frac{1}{v_{t,j}} = \alpha \frac{1}{v_{measured}} + (1 + \alpha) \frac{1}{v_{t-1,j}}, \quad [3.3]$$

gdje je $v_{t,j}$ izračunata srednja brzina u vremenu t i detektorskoj jedinici j , $v_{measured}$ je izmjerena brzina na detektorima, a α je parametar izgladivanja čija se vrijednost kreće od 0 do 1. Srednja se brzina izračunava za svaki trak posebno. Pretpostavlja se da najrestriktivnija traka regulira brzinu, odnosno traka s najnižom prosječnom brzinom se uzima u obzir prilikom određivanja ograničenja brzine za sve trake. Promjenjiva ograničenja brzine ažuriraju se svake 4 sekunde. Algoritam prolazi kroz sve detektore počevši od najnižvodnijeg detektora uključenog u sustav. [3]

4. ANALIZA BUDUĆEG RAZVOJA KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE

Mnogi sustavi predloženi u projektima i od strane proizvođača vozila još nisu razvijeni ili barem još nisu implementirani na tržištu. Stoga se može samo zamisliti koliki će utjecaj kooperativni sustav imati na pojedinačnim vozilima i cjelokupnom prometu sustav.

Budućnost V2I komunikacije obećava revolucionarne promjene u prometnom sektoru. Napredak u području povezivosti i mrežne infrastrukture, uključujući uvođenje 5G mreže, pružit će snažnu podršku brzom i pouzdanom prijenosu podataka između vozila i infrastrukture. Integracija umjetne inteligencije (AI) i strojnog učenja (ML) omogućit će dublju analizu i predviđanje prometnih gužvi, optimiziranje putanja vozila te poboljšanje sigurnosti na cestama. AI će omogućiti inteligentne infrastrukturne sustave koji komuniciraju s vozilima i pružaju informacije u stvarnom vremenu. Na primjer, pametni semafori mogu dinamički prilagoditi vremena signala na temelju prometnih uvjeta, optimizirajući protok prometa. Dodatno, komunikacijski sustavi vozilo-infrastruktura (V2I) i vozilo-vozilo (V2V) pokretani umjetnom inteligencijom poboljšat će sigurnost, koordinaciju i učinkovitost na cestama. [27]

Razvoj potpuno autonomnih vozila značajan je fokus za budućnost. Algoritmi umjetne inteligencije, u kombinaciji s naprednim senzorskim tehnologijama i tehnikama dubinskog učenja, omogućit će vozilima navigaciju u složenim prometnim scenarijima i rješavanje svih zadataka vožnje bez ljudske intervencije. Ovo postignuće ima potencijal revolucionirati prijevoz poboljšanjem sigurnosti na cestama, smanjenjem prometnih gužvi i povećanjem ukupne učinkovitosti.

AI će nastaviti napredovati u predviđanju i upravljanju obrascima prometa. Analizirajući ogromne količine podataka u stvarnom vremenu iz različitih izvora, uključujući senzore, GPS sustave i društvene mreže, algoritmi umjetne inteligencije pružit će točna i ažurna predviđanja prometa. To će omogućiti bolje upravljanje prometom, uključujući dinamičko rutiranje, sprječavanje zagušenja i optimiziranu kontrolu prometne signalizacije, što će rezultirati glatkijim i učinkovitijim transportnim sustavima.

AI može optimizirati logističke operacije analizom velikih skupova podataka, optimiziranjem ruta, predviđanjem potražnje i učinkovitijim upravljanjem zalihama. To dovodi do ušteda troškova, bržih isporuka i boljeg korištenja resursa. [27]

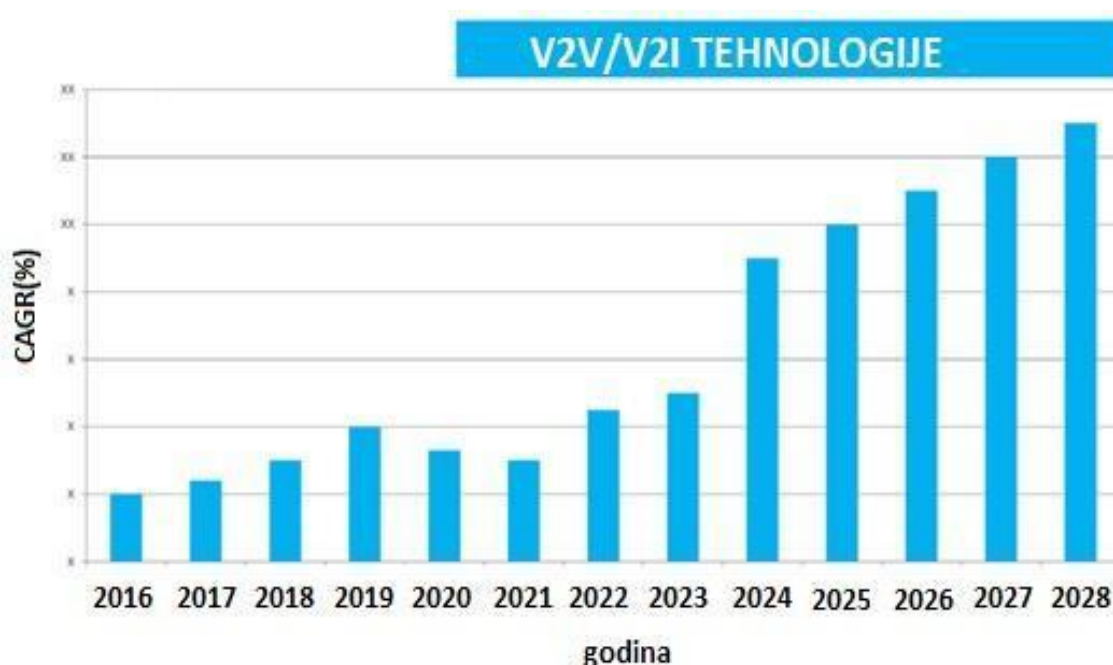
Upravljanje prometnim informacijama, širenje podataka o prometu i korištenje tih podataka za poboljšanje rada prometne signalizacije temeljni su izazovi za poboljšanje sigurnosti i učinkovitosti prometa. Učinkovito širenje prometnih informacija za vozače kako bi dobili odgovarajuće informacije kako bi se osigurala glatka i sigurna vožnja veliki je izazov. Jedan od značajnih izazova primjena u prometu s kojim bi se trebalo pozabaviti je agregacija podataka koja se bavi prikupljanjem podataka iz okolnih vozila kako bi se dobile odgovarajuće prometne informacije. Prometna sigurnost i učinkovitost te upravljanje cyber-sigurnim prijetnjama u velegradskim područjima postali su ozbiljni problemi u pametnim gradovima. [6]

U budućnosti će komunikacijska mreža CVIS kombinirati tzv. tehnologiju interleave, tj. tehnologiju preplitanja i usvojiti tehnologije kodiranja kanala za učinkovito sprječavanje smetnji od izvora u bežičnoj mrežnoj komunikaciji. Napadač mijenja i krivotvori informacije koje prenose vozila i jedinice uz cestu, što može utjecati na prosudbu vozača i dovesti do prometnih nesreća. U budućnosti će komunikacijska tehnologija za CVIS usvojiti metodu modulacije signala s dobrim svojstvom prikrivanja kako bi se spriječilo napadače da presretnu informacije i šifrirane informacije koje prenose vozila i jedinice uz cestu te kako bi ih se udaljilo od ometanje paketa podataka koji koriste čvorove za prijenos informacija. Osim toga, zbog velikih brzina kretanja vozila, topologija komunikacijske mreže i cestovno okruženje se stalno mijenjaju. Komunikacijska mreža će se suočiti s različitim nepoznatim napadima, pri čemu je otkrivanje upada u mrežu posebno važno [25]. U budućnosti se takve metode kao što su strojno učenje i dubinsko učenje mogu koristiti za automatski nadzor upada u mrežu i suočavanje s nepoznatim napadima, kako bi se osigurala sigurnost komunikacijske mreže autoputa. [28]

4.1. Tržište V2I tehnologije

Kao što je već ranije spomenuto, izazov s kojim se suočava tržište automobilskih V2I tehnologije je privatnost i sigurnost podataka. Kako se sve više osobnih i osjetljivih informacija prikuplja i prenosi, povećani je rizik od kibernetičkih

napada i povrede podataka, no očekuje se da će tržište automobilskih V2V / V2I tehnologija rasti godišnje za 5,7% (CAGR 2023. - 2030.). Porast godišnje stope rasta tržišta V2V i V2I tehnologije prikazan je na grafikonu 1. za razdoblje od 2016. godine do 2028. Globalno tržište automobilskih V2V / V2I tehnologija posljednjih je godina doživjelo značajan rast, potaknut različitim čimbenicima kao što su povećana potražnja potrošača, tehnološki napredak i vladine politike koje ga podržavaju. Sve veća upotreba kooperativnih automobilskih tehnologija u raznim industrijama kao što su zdravstvo, obrazovanje i transport također pridonose rastu tržišta. Sve veća potražnja za sigurnim i učinkovitim transportnim sustavima, zajedno sa sve većim fokusom proizvođača automobila na integraciju naprednih tehnologija u vozila, ključni su pokretački čimbenici za rast tržišta. [29]



Grafikon 1. Složena godišnja stopa rasta tržišta V2V i V2I tehnologije od 2016. do 2028. godine, [29]

Očekuje se da će tržište automobilskih V2V / V2I tehnologija svjedočiti dvoznamenkastom rastu u nadolazećim godinama u svim većim regijama uključujući Sjevernu Ameriku (NA), Azijsko-pacifičku (APAC), Europu, Sjedinjene Države (SAD) i Kinu. Sjeverna će Amerika dominirati tržištem zbog sve veće provedbe propisa koji promiču komunikaciju između vozila i vozila s infrastrukturom. Ta će regija imati najveći udio na tržištu s procijenjenom procjenom od više od 40% ukupnog tržišnog udjela. Ova se dominacija može pripisati ranom prihvaćanju takvih

tehnologija u regiji i prisutnosti uspostavljene infrastrukture za podršku njihovoj implementaciji. Slično tome, očekuje se da će azijsko-pacifička regija u nadolazećim godinama svjedočiti značajnom rastu, zbog sve većeg usvajanja naprednih tehnologija i rastuće potražnje za povezanim vozilima. Također se očekuje da će Kina pokazati značajan rast na tržištu automobilskih kooperativnih tehnologija, prvenstveno zbog sve veće potražnje za električnim vozilima i pratećih državnih propisa koji promiču zeleni prijevoz.

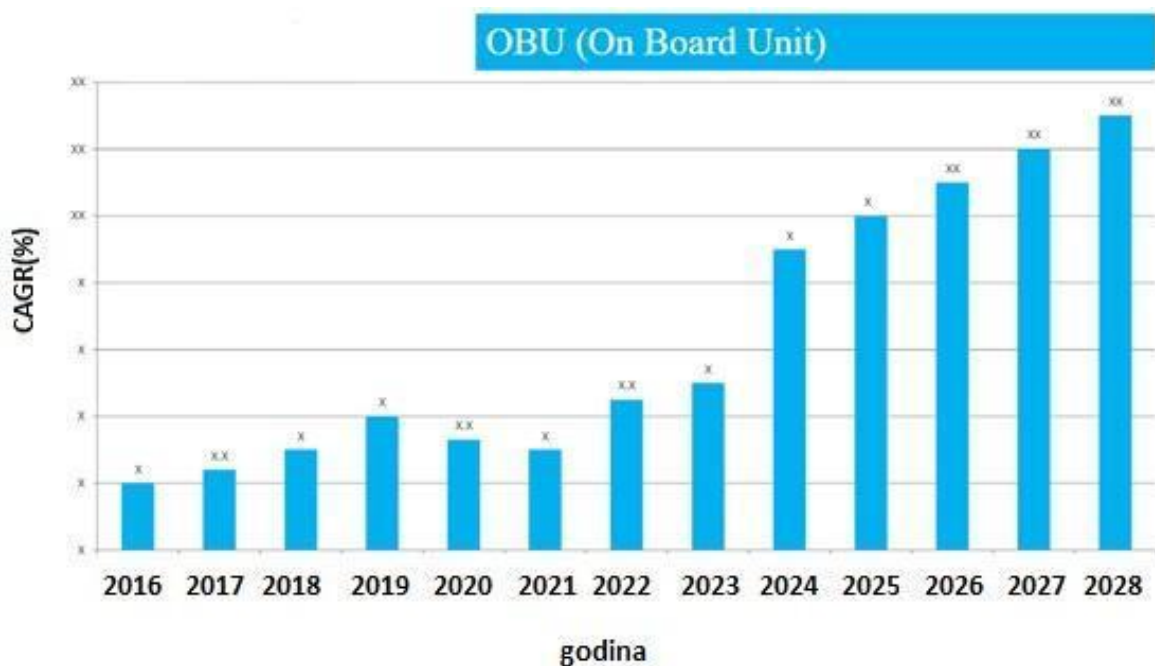
Automobilske tehnologije V2V (od vozila do vozila) i V2I (od vozila do infrastrukture) igraju ključnu ulogu u poboljšanju sigurnosti na cestama i smanjenju prometnih gužvi. Autotalks, Cohda Wireless, Delphi, Denso, Kapsch TrafficCom, Savari, Qualcomm, Commsignia, Hyundai Mobis i Marvell neki su od istaknutih proizvođača na ovom tržištu. Autotalks, Cohda Wireless i Delphi vodeći su na tržištu, dok su Commsignia, Hyundai Mobis i Marvell relativno novi sudionici. Ove tvrtke pokreću rast na automobilskom V2V/V2I tržištu nudeći rješenja koja poboljšavaju sigurnost vozača i protok prometa. Autotalks ima prihod od oko 20 milijuna dolara, Cohda Wireless ima prihod od oko 10 milijuna dolara, a Savari ima prihod od oko 5 milijuna dolara. [29]

4.2. Tržište jedinica u vozilu

Očekuje se da će tržište jedinica u vozilu, OBU (On Board Unit) godišnje rasti za 11% u razdoblju od 2023. – 2030. godine. Predviđa se da će globalna tržišna veličina OBU-a dosegnuti više milijuna do 2030., u usporedbi s 2021., uz neočekivani CAGR tijekom 2023.-2030. Porast godišnje stope rasta tržišta ITS postaja u vozilu od 2016. godine do 2028. prikazan je grafikonom 2. Očekuje se da će tržište za OBU svjedočiti značajnom rastu potaknutom sve većom potražnjom za pametnim prijevozom i dolaskom novih tehnologija kao što su 5G, IoT i AI. Štoviše, očekuje se da će provedba strogih propisa za smanjenje emisije ugljika i promicanje održivog prijevoza dodatno potaknuti rast OBU tržišta. Istraživanje tržišta pokazuje da je tržište vrlo konkurentno, s nekoliko proizvođača koji nude raznoliku ponudu proizvoda i usluga kako bi zadovoljili rastuće potrebe kupaca. [30]

Vrste tržišta za OBU-e podijeljene su u dvije kategorije: OBU s jednim čipom (bez sučelja IC kartice) i OBU s dvostrukim čipom (sa sučeljem IC kartice). Prva je

jeftinija opcija, dok druga nudi dodatne funkcije poput obrade plaćanja i autentifikacije korisnika.



Grafikon 2. Složena godišnja stopa rasta tržišta ITS postaje u vozilu, OBU od 2016. do 2028. godine, [30]

Tržišne primjene OBU-a su uglavnom u gospodarskim i osobnim vozilima. Komercijalna vozila koriste OBU za naplatu cestarine, upravljanje gorivom i praćenje. Osobna vozila koriste OBU za naplatu cestarine i GPS navigaciju. OBU-ovi na oba tržišta pružaju učinkovite i prikladne opcije plaćanja, čineći tako putovanje bez problema za vozače.

Očekuje se da će globalno tržište Onboard Unit (OBU) svjedočiti značajnom rastu u regijama poput Sjeverne Amerike, Europe, Azije i Pacifika i Kine, prvenstveno potaknuto sve većim prihvaćanjem inteligentnih transportnih sustava i rastućom potrebom za pametnom transportnom infrastrukturom. Očekuje se da će Sjeverna Amerika dominirati tržištem zbog visokog razvoja inteligentnih transportnih sustava u regiji, a slijedi je Europa, koja bilježi povećana ulaganja u istraživanje i razvoj za inovativna transportna rješenja. Sve veći broj komercijalnih vozila i sve veća potražnja za učinkovitim sustavima naplate cestarine dodatno dopunjuju rast tržišta u ovim regijama. S druge strane, ubrzanom urbanizacijom i porastom stanovništva, Očekuje se da će Azijski Pacifik zabilježiti najveću stopu rasta zbog sve veće potrebe za učinkovitim transportnim sustavom.

On Board Unit (OBU) je uređaj koji se koristi u inteligentnim transportnim sustavima (ITS) koji je instaliran u vozilima za prikupljanje i razmjenu informacija s drugim uređajima. Savari, Q-Free, HFW, Runan Rtechnology, Kapsch Group, JSA, Mitsubishi, Beijing Juli Science&Technology CO.,Ltd. i Danlaw Inc. neke su od istaknutih tvrtki koje djeluju na OBU tržištu. Među tim tvrtkama, Kapsch Group, Mitsubishi i Q-Free smatraju se vodećima na tržištu, dok su Runan Rtechnology, HFW i Beijing Juli Science&Technology CO.,Ltd. pojavljuju se kao novi sudionici na ovom tržištu. Te tvrtke mogu pomoći u rastu OBU tržišta razvojem naprednih OBU uređaja koji nude preciznije i pouzdanije informacije, nisku potrošnju energije i kompatibilnost s različitim komunikacijskim protokolima. Također mogu proširiti korisnost uređaja integracijom dodatnih značajki kao što su usluge temeljene na lokaciji, multimedijски streaming i infotainment. Q-Free je prijavio prihod od prodaje od 112 milijuna dolara u 2019., dok je Kapsch grupa ostvarila približno milijardu dolara prihoda u istoj godini. Savari i Danlaw Inc. nisu javno objavili svoje prihode od prodaje. [30]

Očekuje se da će rat između Rusije i Ukrajine i pandemija nakon Covid-19 imati značajan utjecaj na tržište OBU-a. Rat je doveo do pada trgovine između dviju zemalja, što je utjecalo na potražnju za OBU uređajima u Ukrajini. U međuvremenu, pandemija je poremetila globalne opskrbe lance, što je dovelo do nestašica komponenti i utjecalo na proizvodni kapacitet.

Međutim, unatoč ovim izazovima, očekuje se rast OBU tržišta u nadolazećim godinama. Ovaj će rast prvenstveno biti potaknut sve većom potražnjom za povezanim vozilima i sve većim prihvaćanjem telematičkih rješenja od strane operatera vozni parkova. Osim toga, napredak u tehnologiji, poput integracije umjetne inteligencije i strojnog učenja, dodatno će potaknuti rast tržišta. [30]

4.3. Tržište jedinica uz cestu

Očekuje se da će tržište jedinica uz cestu (RSU) značajno rasti tijekom predviđenog razdoblja, između 2022. i 2030. Tržište trenutno pokazuje stabilan rast u 2023., a uz provedbu strateških mjera od strane ključnih igrača, predviđa se da će dodatno proširiti tijekom predviđenog razdoblja. Predviđa se da će tržišna veličina jedinice uz cestu (RSU) dosegnuti više milijuna USD do 2029., u usporedbi s 2022., uz neočekivani CAGR tijekom 2022.-2029. [31]

Sjeverna Amerika, posebice Sjedinjene Države, ima ključnu poziciju na tržištu Road Side Unit (RSU) i ne treba ih zanemariti. Sve promjene u Sjedinjenim Američkim Državama mogu imati značajan utjecaj na trend razvoja tržišta. Tijekom predviđenog razdoblja, očekuje se da će tržište Sjeverne Amerike doživjeti značajan rast. [32]

Ključni globalni proizvođači jedinice uz cestu uključuju Savari, Fluidmesh Networks, Beijing Juli ScienceandTechnology CO.,Ltd., Danlaw Inc., Siemens, HFW i Transpeed, itd. Predviđanja za razdoblje do 2030. godine u vezi s proizvođačima RSU tehnologije ovise o mnogim čimbenicima, uključujući usvajanje CVIS tehnologije, regulativne okvire i ulaganja u prometnu infrastrukturu.

Razvoj pametnih gradova i autonomnih vozila stvara potrebu za razvijenom infrastrukturom koja podržava komunikaciju između vozila, infrastrukture i drugih povezanih uređaja. RSU uređaji su ključni element tog ekosustava, omogućujući pametnu prometnu mrežu.

Tijekom pandemije COVID-19, uz smanjen promet i ekonomske neizvjesnosti moglo je doći do odgađanja ili smanjenja ulaganja u infrastrukturu RSU. Mnoge zemlje su usredotočene na hitne zdravstvene potrebe i oporavak gospodarstva, što je moglo rezultirati manjim prioritetom za implementaciju ili proširenje RSU mreže. utjecaj pandemije na tržište RSU ovisio o regionalnim uvjetima, prioritetima vlada i razini implementacije tehnologije u pojedinim zemljama. Unatoč privremenim izazovima, dugoročna perspektiva za tržište RSU ostaje pozitivna, jer su ciljevi sigurnosti i prometne učinkovitosti i dalje važni, a potreba za pametnom prometnom infrastrukturom će se vjerojatno nastaviti i u post-pandemijskom svijetu. [31]

4.4. Budućnost V2I komunikacije u industriji

Uz današnji tehnološki napredak, osnovno nije dovoljno. Rješenja su sve naprednija, a konkurencija je na vrhuncu. Rastući zahtjevi potrošača zahtijevaju end-to-end sigurnost i komunikaciju između vozila i uređaja kao kooperativnu tehnologiju.

4.4.1. Autonomna vozila

Iako su autonomna vozila dobro opisana u području sustava cestovnog prometa, ona industrijska (AIV - autonomous industrial vehicle) još traže svoju primjenu. Uspostava i implementacija AIV vozničkih parkova u industrijskim poduzećima i dalje je problematična u nekoliko pogleda, uključujući njihovu prihvatljivost od strane zaposlenika, lokaciju vozila, fluidnost prometa i percepciju vozila o promjenjivom i stoga dinamičnom okruženju. [33]

Autonomna vozila koriste se za smanjenje kašnjenja u transportu u industrijskoj logistici. AIV, samovozeći kamioni ne trebaju ljudske vozače za sigurno upravljanje, sadrže senzore i softvere za nadzor, navigaciju i upravljanje vozilima te pripadaju petoj kategoriji autonomnosti. Tehnički razvoj autonomnih vozila povezan je s navigacijskim sustavima koji im omogućuju izmjenu u gradskom prometu. Te su strukture pretežno praćenje trake ili prilagodljivi radar za udaljenost i GPS navigacija. Komunikacija kratkog dometa (engl. *Near Field Communication*, NFC) omogućuje visoku brzinu u logističkim transportnim uslugama, no za tržišne zadatke povezane s dostavom robe koristi se bežično umrežavanje. Korištenje bežičnih komunikacijskih tehnologija i interneta za stvaranje pametnijeg sustava za pohranu podataka povećava ukupnu konkurentnost poduzeća i automatizaciju upravljanja. To uključuje odabir rute, procjene vjerojatnosti promjene rute na alternativnu, vrijeme vožnje, redoslijed točaka ponašanja, vrijeme zahtjeva ili vrijeme čekanja. Model odabira rute u prijenosnom putu mora se izračunati korištenjem postavljenih varijabli, varijabli kriterija, varijabli odluke, funkcija cilja i ograničenja. Koncept Interneta stvari (IoT - Internet of Things) dopušta međusobnu komunikaciju, međupovezanost i interakciju između sudionika u opskrbnom lancu koji omogućuju dinamičko upravljanje operacijama globalne transportne mreže. IoT olakšava obradu i sigurnu razmjenu logističkih podataka u stvarnom vremenu između različitih strana i kontrolu donošenja odluka koje se odnose na kontrolu aktivnosti prijevoza robe kroz logističku mrežu. [34]

Jedan od primjera primjene autonomnih vozila u industrijskom okruženju je Caterpillar kao predvodnik s najvećom svjetskom autonomnom flotom tegljača rudarske industrije koja broji više od 500 strojeva. [35]

Jedan od najvećih svjetskih operatora teretnih luka, APM Terminals ima inovativni dizajn Maasvlakte II Rotterdam te uključuje proces koji se temelji na korištenju automatiziranih, daljinski upravljanih brod-obala dizalica za istovar kontejnera s plovila i njihovo izravno postavljanje na automatizirana vođena vozila (AGV - Automated Guided Vehicles). AGV mogu nositi i do dva kontejnera odjednom te ih automatski odvoze od pristaništa do kontejnerskog skladišta pomoću ugrađenog navigacijskog sustava. APM Terminals Maasvlakte II Rotterdam upravljat će s 37 AGV-a na baterijski pogon, 87 baterijskih paketa i dvije robotske stanice za izmjenu baterija gdje je omogućena automatizirana zamjena baterijskog paketa. Uklanjanjem diesel motora uklonjene su emisije štetnih ispušnih plinova te buka motora. Kada AGV nije angažiran oko ukrcaja i iskrcaja, sustav ima mogućnost tzv. održavanja gdje slaže kontejnere zbog lakšeg pristupa za sljedeći ukrcaj. Ova značajka automatizirane optimizacije skladišta tijekom mirnih razdoblja omogućuje bolju učinkovitost u vršnim vremenima. [36]

V2I komunikacija se koristi u teretnim lukama kako bi se poboljšala sigurnost i učinkovitost transporta tereta. Komunikacija između autonomnih vozila i luke, terminala, signalizacije, itd. koristi za slanje informacija o prometnoj situaciji na području luke i to: podaci o prometnom zagušenju, preprekama, alternativnim rutama. Na temelju informacija, autonomna vozila prilagođavaju brzine i rute kako bi se izbjegla zagušenja i prepreke što povećava učinkovitost prijevoza tereta unutar luke. Također, senzori na autonomnom tegljaču mogu otkriti prepreke na putu i poslati informaciju natrag u infrastrukturu luke koja upozorava ostala autonomna vozila u blizini kako bi se osigurala sigurnost luke. V2I tehnologija također može pomoći u planiranju i praćenju putovanja autonomnih vozila pružajući informacije o rasporedu dolazaka i odlazaka brodova u luci što smanjuje vrijeme čekanja te smanjenje troškova. [36]

4.4.2. Truck platooning

Cestovni vlak (engl. **Truck platooning**), tj. skup vozila koja putuju zajedno, aktivno usklađeni u formaciji tehnologija je upravljanja kamionima namijenjena revoluciji u logistici, optimiziranju kopnenog prijevoza, uštedi goriva i smanjenju emisija štetnih plinova. V2I komunikacija u vlakovima se ostvaruje pomoću senzora i kamera postavljenih uz cestu te su vozilu pružene informacije o stanju ceste,

prometnim uvjetima, preprekama i drugim relevantnim čimbenicima koji utječu na uvjete vožnje u vlakovima kamiona. Osim V2I komunikacije, vozila unutar vlaka mogu međusobno komunicirati putem V2V komunikacije. Pojednosti koncepta vlaka razlikuju se od projekta do projekta jer postoje različiti ciljevi i motivacije za rad vlaka, kao i različita tehnička rješenja. [37]

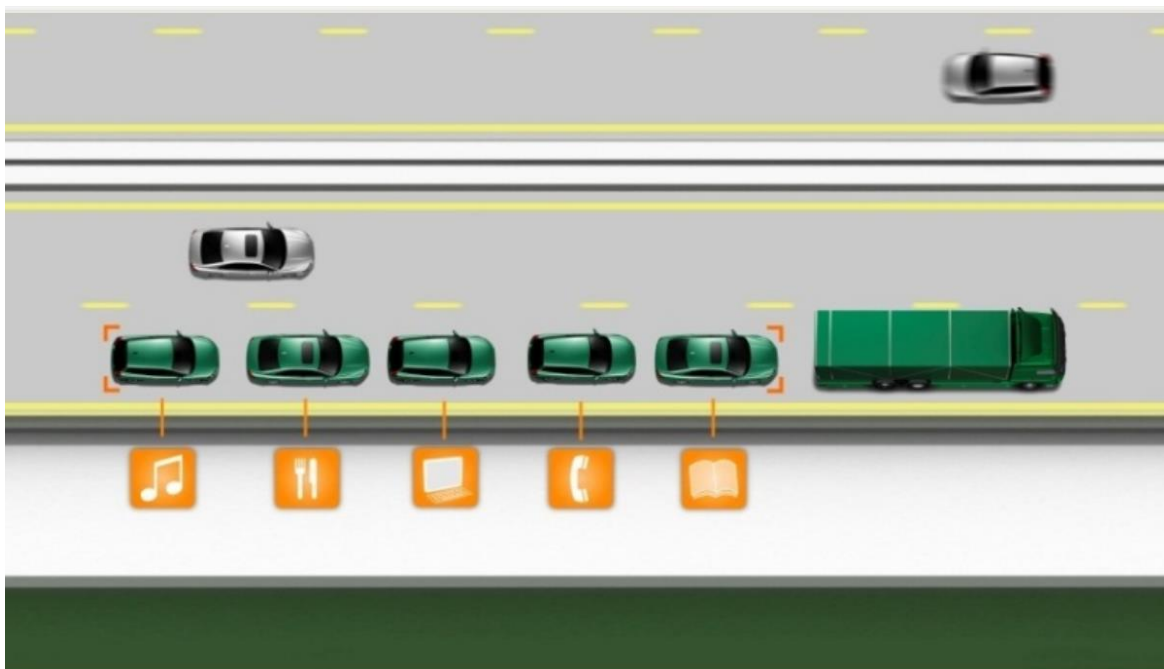
PATH je kalifornijski program automatizacije prometa koji uključuje platooning. To istraživanje o automatiziranim cestovnim vlakovima u početku je bilo potaknuto potrebom da se značajno poveća kapacitet traka autocesta kako bi se zadovoljila prometna potražnja minimalnom izgradnjom nove infrastrukture. PATH kinematičke studije kapaciteta autoceste pokazale su kako je povećanje kapaciteta traka moguće ako bi vozila formirala vlakove do 10 automobila. Razmaci između vlakova bili bi dovoljni za osiguranje razmaka sigurnog za zaustavljanje vozila sljedećeg konvoja maksimalnim usporenjem. Neke razlikovne značajke PATH pristupa uključuju [38]:

- sva su vozila potpuno automatizirana, uključujući i vodeće vozilo,
- odvojeni cestovni vlakovi za laka vozila, autobuse ili kamione kako bi se izbjegli sigurnosni problemi s neusklađenim masama vozila ako se sudare,
- bočna upravljanje u odnosu na apsolutne referentne oznake trake, ali uzdužno u odnosu na prethodno vozilo i vodeće vozilo,
- kretanje u prometnoj traci zaštićenoj od upada nekompatibilnih vozila kako bi se povećala sigurnost i minimizirale neočekivane opasnosti.

SARTRE je projekt sufinanciran od Europske komisije koji podržava promjene u primjeni transporta. Vizija projekta je razviti i integrirati rješenja koja omogućuju vozilima vožnju u nizovima na javnim autocestama bez izmjene infrastrukture kao što su namjenske trake. SARTRE definira vlak kamiona kao skup vozila predvođenih ručno vođenim teretnim vozilom. Vozila iza, ili teretna vozila ili osobni automobili, automatski slijede vodeće vozilo uzdužno i bočno nastojeći održati određen razmak u odnosu na vozilo ispred te se pridružuju i napuštaju vod dinamički. Vlak kamiona čini kooperativni sustav u kojem su vozila koja sudjeluju podsustavi te su senzorski sustav i kontrolni algoritam raspoređeni po cijelom konvoju, a podaci se prenose između vozila na principu V2V komunikacije.

Korištenje V2V komunikacije uz lokalne senzore u svakom vozilu je bitno za izbjegavanje bočnih i uzdužnih nestabilnosti u vodu koja su uzrokovana akumulacijom kašnjenja i pogrešaka kod mjerenja kretanja cestovnog vlaka iz perspektive lokalnog vozila. Mjerenja lokalnih senzora temelje se samo na susjednom vozilu, tj. nema „gledanja unaprijed“ u vlaku bez V2V komunikacije. [38]

Slika 10. prikazuje cestovni vlak projekta SARTRE. Vlak je sastavljen od pet vozila. [38]



Slika 10. Cestovni vlak projekta SARTRE, [38]

Energy ITS, nacionalni ITS projekt japanskog Ministarstva gospodarstva, trgovine i industrije koji je započeo 2008. godine ima za cilj uštedu energije i prevenciju globalnog zagrijavanja s ITS tehnologijama. Ima dvije teme: automatizirani cestovni vlak kamiona i metoda procjene učinkovitosti ITS-a na uštedu energije. Još jedna motivacija za projekt je ublažavanje nedostatka kvalificiranih vozača. Cestovni vlak od tri automatizirana kamiona vozi brzinom od 80 km/h s razmakom od 10 m. Bočno upravljanje temelji se na detekciji oznaka vozne trake pomoću računalnog vida, a uzdužno upravljanje na mjerenju razmaka pomoću radara i lidara. [38]

U Grand Cooperative Driving Challenge (**GCDC**) 2011. godine održanog u Helmondu i Eindhovenu u Nizozemskoj određen broj vozila je sudjelovao u

scenarijima cestovnih vlakova u gradskoj vožnji i vožnji autocestom. Cilj je bio ubrzati razvoj, integraciju, demonstraciju i implementaciju kooperativnih sustava vožnje, temeljenih na kombinaciji V2V i V2I komunikacijskih infrastruktura. Izazov je bio pokazati kako se šok valovi u prometu mogu ublažiti i povećati protok prometa smanjenjem razmaka između vozila. Sva vozila u vlak u su bila uzdužno automatizirana i bilo koje vozilo je moglo voziti na čelnoj poziciji, tj. mijenjati uloge između čelnog i pratećeg vozila. [38] Jedan scenarij prikazan je slikom 11.



Slika 11. GCDC predstavljanje scenarija cestovnih vlakova, [39]

Glavni interes **SCANIA** platooning-a je usredotočen na teška teretna vozila na autocestama s fokusom na minimiziranje potrošnje goriva. Interes je izražen u dva nacionalna švedska projekta:

1. Distribuirana kontrola konvoja teških teretnih vozila (Distributed Control of a Heavy Duty Vehicle Platoon),
2. iQFleet.

Distribuirana kontrola vlakova teških teretnih vozila je suradnja između Scanije i Kraljevskog tehnološkog instituta, engl. *KTH Royal Institute of Technology* koja je dijelom sufinancirana od švedske vlade. Glavni fokus projekta je kako vozilo u vlak u može biti učinkovito upravljano i kontrolirano bez ugrožavanja sigurnosti. Uzdužno

upravljanje je automatski kontrolirano dok je bočno upravljanje ručno. Arhitektura upravljanja je razvijena na temelju distribuirana kontrole, što znači da je svako vozilo odgovorno za vlastito upravljanje na temelju informacija s urađenih senzora poput radara, kamera itd. i razmjene informacija između vozila u vlaku.

iQFleet je suradnja između KTH, VTI (Švedski nacionalni institut za istraživanje cesta i prometa) i Trafikverketa-a (Švedska prometna uprava) te je djelomično financiran od švedske vlade. Istraživanje je usmjereno na to kako bi se konvoji trebali kontrolirati u odnosu na druge korisnike prometnice, topologiju ceste, infrastrukturu... Cilj je razviti strategiju i arhitekturu koja podržava vožnju i usmjeravanje niza cestovnog vlaka na optimalan način s obzirom na uvjete na cesti. [38]

Tablica 1. Pregled značajki četiri sustava cestovnog vlaka, [38]

	SARTRE	PATH	GCDC	Energy-ITS	SCANIA
Tip vozila	mješovito	osobni automobili ili teška teretna vozila	mješovito	teška teretna vozila	teška teretna vozila
Kontrola/ upravljanje	uzdužno i bočno	uzdužno i bočno	uzdužno	uzdužno i bočno	uzdužno
Zahtjevi infrastrukture	nema	referentne oznake na površini ceste	visoko precizno pozicioniranje	označavanje traka	nema
Integracija prometa	mješovito	namjenska traka	mješovito	namjenska traka	autoceste, mješovito
Senzori	proizvodnja	mješovito	najnovija tehnologija i proizvodnja	najnovija tehnologija	nema V2V u prvoj fazi
Ciljevi	udobnost, sigurnost, gužva, energija	povećanje propusnost i po traci	ubрати primjenu sustava kooperativne vožnje	ublažiti nedostaka kvalificiranih vozača	energija

Tablica 1. prikazuje pregled i usporedbu šest parametara svih pet sustava. Parametri su: tip vozila u konvoju, smjer automatske kontrole, zahtjevi ili potencijalne promjene infrastrukture, integracija s ostalim prometom, primarni ugrađeni senzori koji se koriste i glavni ciljevi sustava.

Pregledom parametara dolazi do sistematizacije:

1) SARTRE, PATH i Energy ITS nude automatizaciju i uzdužnog i bočnog upravljanja dok GCDC i SCANIA automatiziraju samo uzdužno upravljanje;

2) SARTRE i GCDC pretpostavlja mješovite vodove teških i putničkih vozila. PATH, SCANIA i Energy ITS pretpostavlja homogene vlakove jednog tipa vozila; 3) SARTRE i SCANIA pretpostavlja da nema promjena u infrastrukturi dok PATH pretpostavlja namjenske trake s ugrađenim referentnim oznakama na površini ceste, GCDC pretpostavlja visoko precizno pozicioniranje i energiju ITS pretpostavlja označavanje traka.

5. VIZUALIZACIJA KOMUNIKACIJE VOZILA I INFRASTRUKTURE U INDUSTRIJSKOM OKRUŽENJU PROŠIRENOM STVARNOŠĆU

U modernoj industriji, suradnja i kooperacija između različitih elemenata sustava postaju ključni faktori za uspjeh. U tom kontekstu, proširena stvarnost (engl. *augmented reality*, AR) sve više dobiva na važnosti kao alat za 3D vizualizaciju kooperativnih sustava. Ova tehnologija omogućuje integraciju virtualnih objekata u stvarno okruženje, stvarajući interaktivno iskustvo koje pomaže u razumijevanju i optimizaciji složenih industrijskih procesa. Korištenjem proširene stvarnosti, korisnici mogu doživjeti interakciju između fizičkih i virtualnih elemenata sustava u stvarnom vremenu. Putem AR uređaja poput pametnih naočala ili mobilnih uređaja, moguće je prikazati virtualne modele strojeva, robota, ljudi ili logističkih tokova na stvarnim lokacijama u industrijskom okruženju. Ovakva integracija omogućuje precizno vizualno predstavljanje prostornih odnosa, interakcija i dinamičkih promjena u stvarnom svijetu.

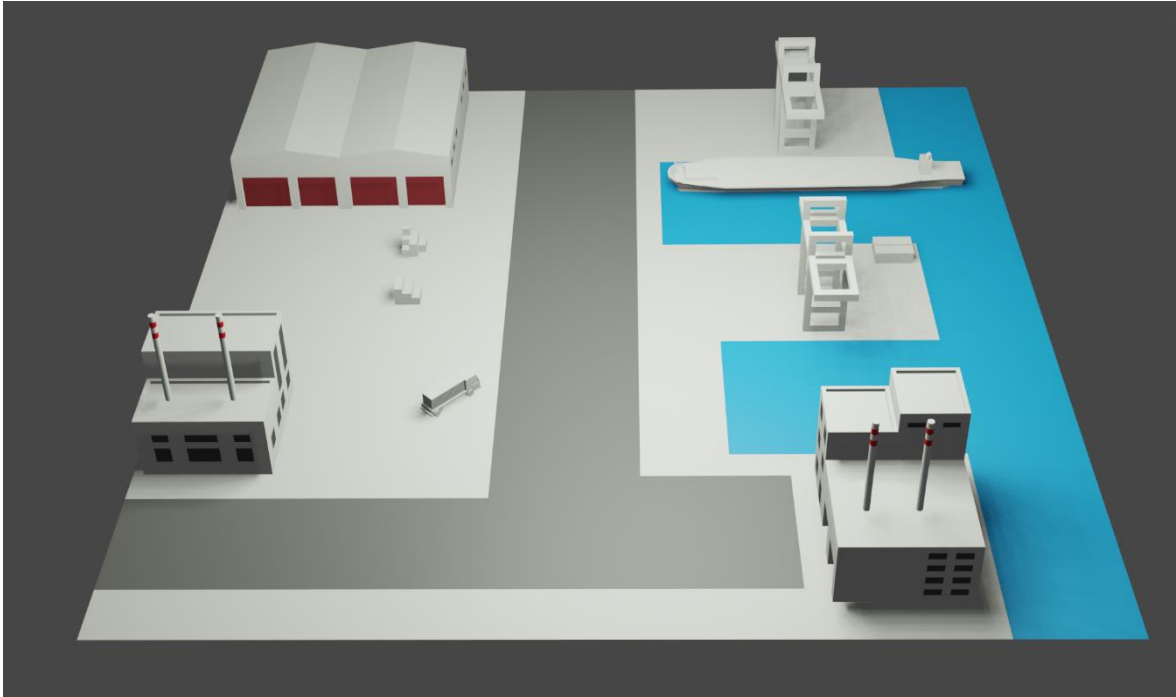
U ovom poglavlju dan je pregled izrade modela pametne luke prikazan proširenom stvarnošću, tj. virtualno okruženje u kojem se simuliraju interakcije između različitih elemenata sustava kao što su strojevi, vozila, infrastruktura...

5.1. Modeli u Blenderu

Detaljni 3D modeli pametne luke kreirani su pomoću alata Blender koji je besplatan i otvoren softver za 3D modeliranje, animaciju i renderiranje. Ovaj alat omogućuje kreiranje realističnog 3D prikaza luke koristeći različite alate i tehnike, uključujući modeliranje objekata, materijala, osvjetljenje i tekstura.

Koristeći Blenderove alate, modelirani su objekti kao što su zgrade, terminali, skladišta, brodovi i vozila. Precizno oblikovanje i dimenzioniranje objekata važno je za točan prikaz.

Dodavanjem materijala i tekstura objektima se pruža vizualna stvarnost, no većini objekata nisu dodani materijali s obzirom da se kasnije koristi još jedan alat Unity koji također ima mogućnost dodavanja materijala i tekstura.



Slika 12. Prikaz modela pametne luke u Blenderu

Na slici 12. vidljivi su svi modeli modelirani u alatu Blender. Kao podloga je vizualiziran 3D objekt Plane kojem su dodani materijali te koji je poslužio kao skica za crtanje podloge.

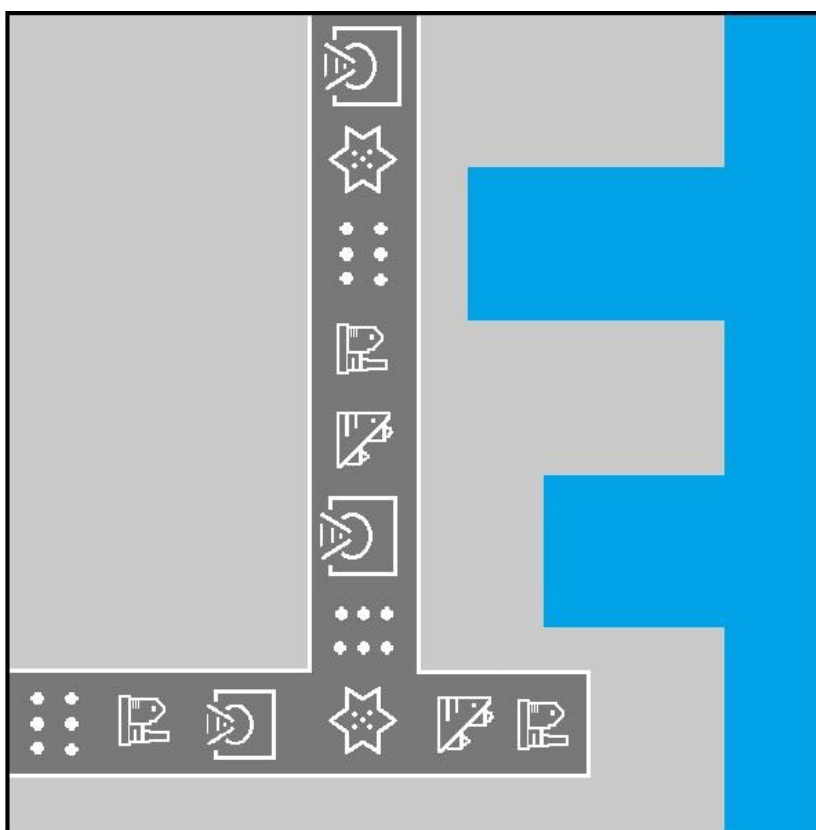
5.2. Modeli u Unity-u

Unity je sveprisutna platforma za razvoj igara i interaktivnih iskustava koja također pruža alat za razvoj aplikacija proširene stvarnosti (AR). Omogućuje kreiranje i animaciju 3D modela koji se mogu dodati u stvarni svijet.

U okviru cilja ovog rada, AR vizualizacije važno je osigurati kvalitetne Image Targete koji omogućuju precizno pozicioniranje virtualnih elemenata u stvarnom svijetu. Image Target u alatu Unity predstavlja vrstu cilja koja se koristi u proširenoj stvarnosti kako bi se prepoznala i pratila slika stvarnog objekta, obično otisnuta na papiru ili prikazana na zaslonu. Vuforia Engine je platforma za razvoj proširene stvarnosti koja omogućuje prepoznavanje slika, tj. Image Targeta te praćenje i postavljanje virtualnih elemenata u stvarnom svijetu. Vuforia koristi praćenje kako bi osigurala stabilnost virtualnih elemenata na slici Targeta čak i prilikom pomicanja kamere.

Kada se uređaj na kojem se prikazuje AR aplikacija usmjeri prema Image Targetu, kamera snima sliku okoline te traži prepoznatljive značajke. Nakon što se Image Target prepozna, aplikacija veže virtualne elemente, tj. modele za taj Target te se time stvara iluzija da se ti elementi nalaze u stvarnom okruženju.

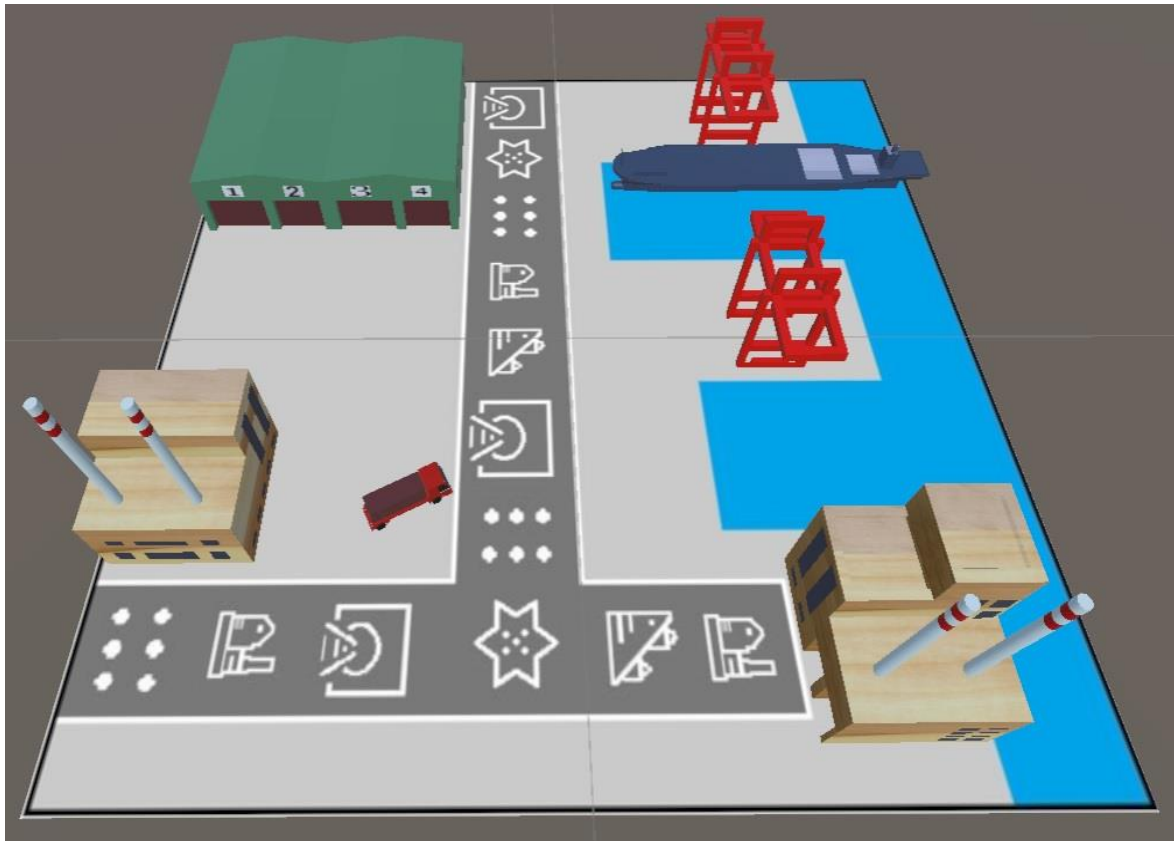
Podloga koja u ovom radu služi kao Image Target je prikazana na slici 13., a nacrtana je u online alatu za crtanje dijagrama Draw.io. Dodani su detalji i ikone koji pomažu kod identifikacije i povezivanja podloge s virtualnim modelima.



Slika 13. Podloga za pozicioniranje modela

Slika je spremljena u odgovarajućem formatu (.png) te je prilagođenih dimenzija kako bi odgovarale stvarnim mjerama objekata. Nakon kreiranja korisničkog računa na Vuforia Developer Portalu, slika podloge učitana je u Vuforijinu bazu podataka te su generirani ključevi i licenca koji se dodaju u Unity projekt. U Unityu je kreirana AR scena vidljiva slikom 14. u kojoj su postavljeni virtualni objekti na Image Targetu.

Stvoreni 3D modeli u .fbx formatu izvezeni su iz Blendera i učitani u Unity.



Slika 14. Scena s modelima iz Blendera u Unity-u

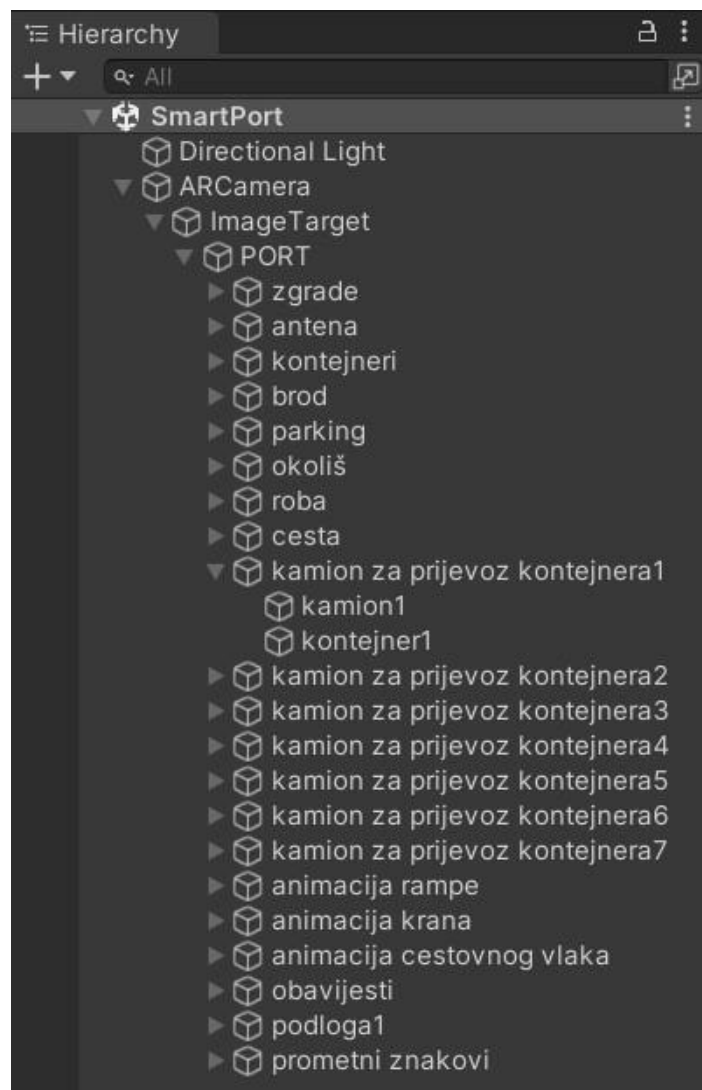
Unity projekt „SmartPort“ sastoji se od dva glavna objekta vidljiva na slici 15.:

- 1) usmjereno svjetlo (engl. *Directional light*)
- 2) AR kamera (engl. *ARCamera*)

Usmjereni svjetlost je tip izvora svjetla koji simulira učinak udaljenog izvora svjetlosti, poput sunca. Emitira zrake svjetlosti u određenom smjeru obasjavajući cijelu scenu paralelnim zrakama. Ovaj tip svjetla nema određenu lokaciju ili položaj u sceni, tj. ono je beskrajno udaljeno i baca sjene u određenom smjeru preko cijele scene.

AR kamera je objekt koji se koristi za implementaciju proširene stvarnosti u igrama i aplikacijama. Ovaj objekt omogućuje kameri da integrira s AR sadržajem u stvarnom svijetu te također zahtijeva integraciju s AR bibliotekama poput ARCore za Android uređaje ili ARKit za iOS uređaje, ovisno o platformi na kojoj se želi implementirati AR aplikacija. Projekt „SmartPort“ izrađen je za Android uređaj. AR kamera sadrži već ranije spomenuti ImageTarget koji sadrži sve 3D objekte prikazane na zaslonu Android uređaja koji se sastoje od glavnog „roditeljskog“

objekta i onih podređenih. U Unityu, roditeljski i podređeni objekti odnose se na objekte u hijerarhiji i njihove međusobne odnose. Roditeljski objekt je onaj koji sadrži druge podređene objekte i koji kontrolira njihovu transformaciju (rotaciju, skaliranje, poziciju). Moguće je imati više razina podređenosti gdje podređeni objekt može imati vlastite podređene objekte. Na slici 15. vidljiv je objekt „kamion za prijevoz kontejnera1“ koji je roditeljski objekt jer sadrži objekt „kamion1“ i „kontejner1“ koji su mu podređeni. Kada je pravljen animacija vožnje kamiona, pravljen je na objektu „kamion za prijevoz kontejnera1“ kako bi se pomicala oba podređena objekta.



Slika 15. Hijerarhija projekta "SmartPort"

Prednosti primjene 3D modela:

- Analiza i vizualizacija: 3D modeli omogućuju brzu i cjelovitu analizu teretne luke. Vozačima i operaterima daju bolji pregled rasporeda terminala, resursa te prometnica unutar luke. Dubina, visine i proporcije infrastrukturnih elemenata postaju jasni. To olakšava razumijevanje prostora i njegov utjecaj na optimizaciju komunikacije.
- Precizna nadogradnja i optimizacija: Korištenje 3D modela omogućava dublje razumijevanje trenutne infrastrukture pametne luke. Ova vizualizacija može pomoći inženjerima i planerima da identificiraju specifična područja za nadogradnju, optimizaciju i rekonstrukciju kako bi se postigla veća učinkovitost i produktivnost.
- Planiranje ruta: 3D modeli omogućuju planiranje ruta vožnje u stvarnom vremenu, uzimajući u obzir vertikalne i horizontalne aspekte teretne luke. Vozači mogu odabrati najoptimalnije puteve koji minimiziraju potrošnju goriva i vrijeme putovanja.
- Obuka osoblja: 3D modeli olakšavaju obuku osoblja jer omogućavaju realistično okruženje za simulaciju različitih scenarija. To rezultira bolje pripremljenim timom i manjim vremenom potrebnim za obuku, povećanjem efikasnosti i sigurnosti operacija.
- Upravljanje sigurnošću: 3D modeli mogu pomoći u analizi rizika i sigurnosnih problema u pametnoj luci. Identificiranje potencijalnih opasnosti omogućava brže poduzimanje preventivnih mjera.

3D modeliranje pametnih luka putem alata poput Blendera omogućuje dublje razumijevanje, bolju vizualizaciju i analizu različitih aspekata logističkih operacija.

U stvaranju vizualno privlačne 3D scene u Unity platformi ključnu ulogu igraju već spomenuti materijali kako bi se postigla željena estetika i izgled objekata. Oni definiraju izgled površina objekata, određujući kako će svjetlo integrirati s njima. Kroz parametre poput boje, sjaja, prozirnosti i tekstura, materijali omogućuju što realniji prikaz objekata u igri ili aplikaciji. Postoji i mogućnost animacije materijala čim se dodaje dinamika i realizam cijeloj sceni, dok napredne tehnike kao što su prozirni materijali ili refleksije doprinose dubini i autentičnosti. Na slici 16. prikazani su svi materijali korišteni u programu Unity te se na slici ne nalazi materijali dodani objektima u platformi Blender.



Slika 16. Materijali korišteni u projektu "SmartPort"

Uz razne resurse i alate dostupne u Unityju, materijali postaju ključni dio postizanja željenog vizualnog doživljaja.

5.3. Animacije u Unity-u

Na sceni projekta prikazana je teretna luka kao složen sustav koji se sastoji od različitih infrastrukturnih elemenata poput terminala za utovar i istovar, kontrolnih točaka, parkirališnih površina itd. Koncept optimizacije komunikacije između vozila i infrastrukture može biti složen i apstraktan. Animacije modela omogućuju nam da razgradimo ovu složenost na manje dijelove i jasno prikažemo kako svaki dio utječe na cjelinu.

Animacije u projektu „SmartPort“ kreirane su na način da opisuju nekoliko scenarija V2I i V2V komunikacije, a to su:

1. dolazak vozila u luku te pružanje svih relevantnih informacija vezanih uz ukrcaj robe,
2. ukrcaj robe s primljenim svim podacima o robi,
3. cestovni vlak kamiona koji dijeli informacije o zastoju.

Scenarij 1:

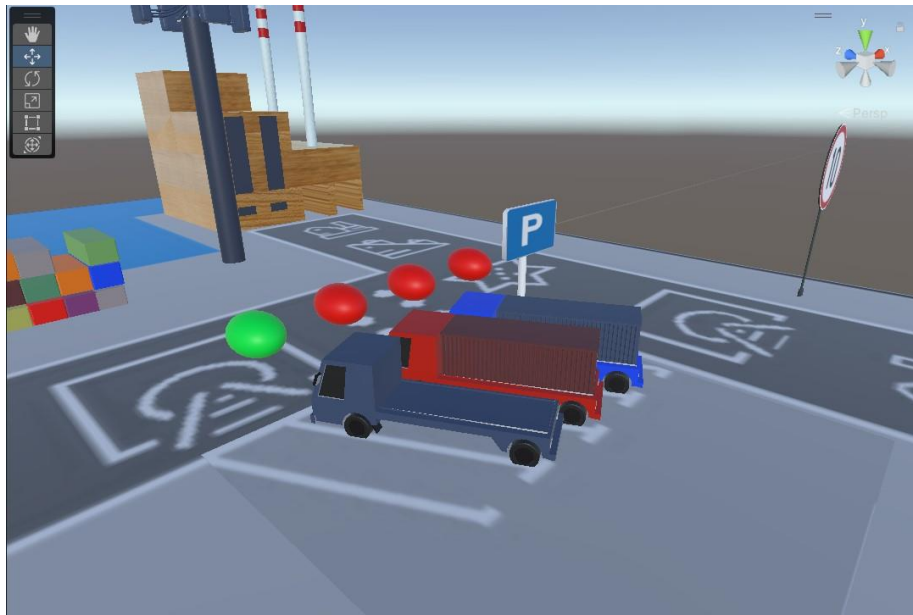
Prvim scenarijem se prikazuje optimizacija upravljanja terminalima kroz komunikaciju vozila i infrastrukture. Prati se vozilo koje ulazi u teretnu luku te se kroz vizualne efekte prikazuje kako vozilo komunicira s infrastrukturom luke putem bežične mreže. Na zaslonu unutar vozila se pojavljuju informacije o vremenu ukrcaja te dostupnom terminalu kao mjestu ukrcaja (slika 17.). Sljedeća obavijest koja se prikazuje jest obavijest o dostupnim parkirnim mjestima sa slike 18. i ograničenje brzine unutar teretne luke sa slike 19. Ovom scenom se ilustrira kako tehnologija omogućuje vozačima brže pronalaženje slobodnih parkirališnih mjesta, smanjujući vrijeme pronalaska. Također, kroz integraciju ograničenja brzine u komunikaciju, tehnologija pomaže u pružanju sigurnosti tijekom vožnje unutar teretne luke.



Slika 17. Prikaz scenarija 1. iz Unity-a i obavijest o vremenu i mjestu ukrcaja

Slikom 17. predstavljen je scenarij 1. u programskom alatu Unity. Vidljiva je obavijest koja se pokazuje unutar zaslona vozila o vremenu ukrcaja i terminalu na

kojem će se ukrcaj izvršiti. Na slici 19. prikazana je scena dolaska kamiona u luku vidljiva na mobilnom Android uređaju na koji je izgrađen projekt „SmartPort“. Vidljiva je obavijest informacija o vremenu i mjestu ukrcaja.



Slika 18. Prikaz parkirališne površine unutar luke

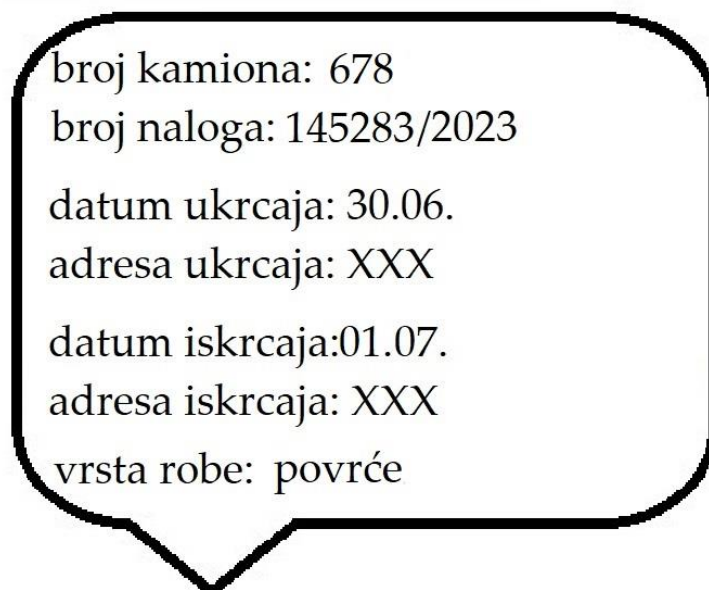


Slika 19. Prikaz scenarija 1. s Android uređaja i obavijest o slobodnim parkirnim mjestima i ograničenju brzine unutar luke

U ovom scenariju kao mjesto za napredak se smatra prikaz dostupnih lokacija za parkiranje tijekom prolaska kamiona kroz luku gdje bi lokacije bile označene bojom kako bi se pokazala trenutna dostupnost. Između ostalog, tijekom putovanja vozilo bi primilo obavijest o ograničenju brzine unutar teretne luke, a na zaslonu bi se pojavilo vizualno upozorenje kao podsjetnik vozaču.

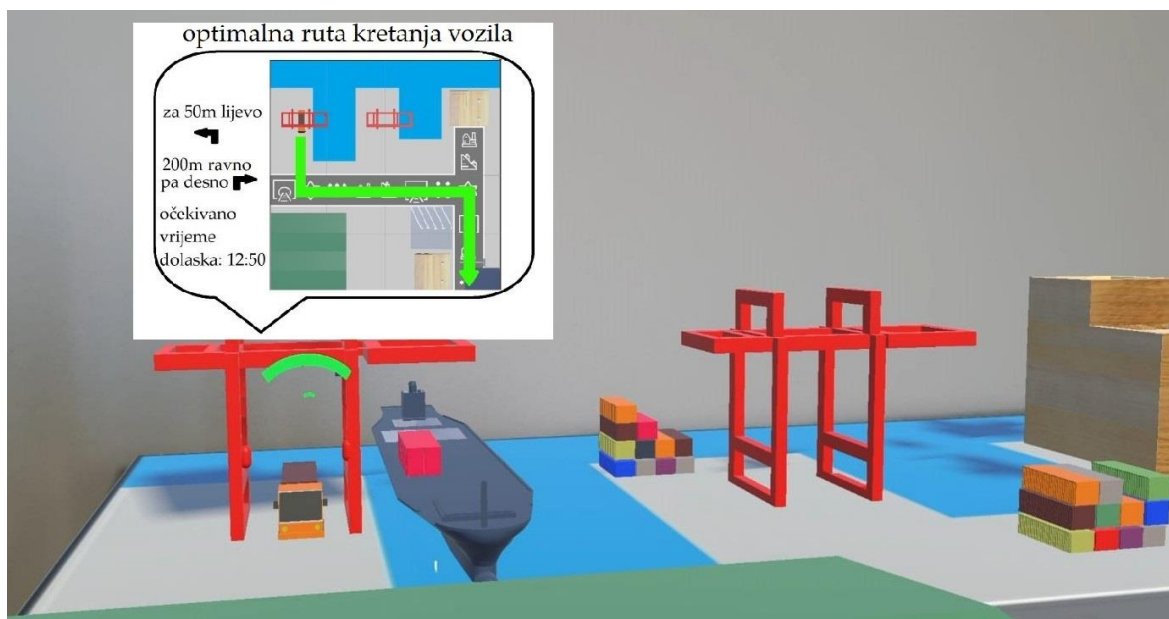
Scenarij 2:

Sljedeći scenarij je ukrcaj robe, tj. kontejnera s kontejnerskog broda. Kamion prilazi mjestu ukrcaja te se senzori na kamionu i terminalu sinkroniziraju kako bi se postiglo točno usklađivanje pozicija. Tek kada je kamion postavljen u savršen položaj, započinje ukrcaj. Na zaslonu vozila se prikazuju informacije o teretu: broj kamiona, broj naloga po kojem se roba ukrcava, datum i mjesto ukrcaja, datum i mjesto iskrcaja te vrsta robe. Informacije o teretu prikazane su slikom 20. te pružaju transparentnost u cijelom logističkom procesu čime se smanjuje mogućnost pogrešaka.



Slika 20. Informacije o teretu kamiona br. 678

Nakon ukrcaja, na zaslonu vozila prikazuje se optimalna ruta putovanja vozila prema izlazu iz luke. Uz prikaz rute, na zaslonu se prikazuje i očekivano vrijeme dolaska na odredište (slika 21.) Precizno planiranje rute omogućuje najkraće moguće vrijeme putovanja smanjujući potrošnju goriva i vremena vožnje.



Slika 21. Optimalna ruta putovanja vozila i očekivano vrijeme dolaska na odredište

Nakon završetka ukrcaja i odlaska vozila, infrastrukturni element šalje obavijest o broju kamiona koji je sljedeći na redu za ukrcaj. Obavijest o sljedećem kamionu prikazana je na slici 22.



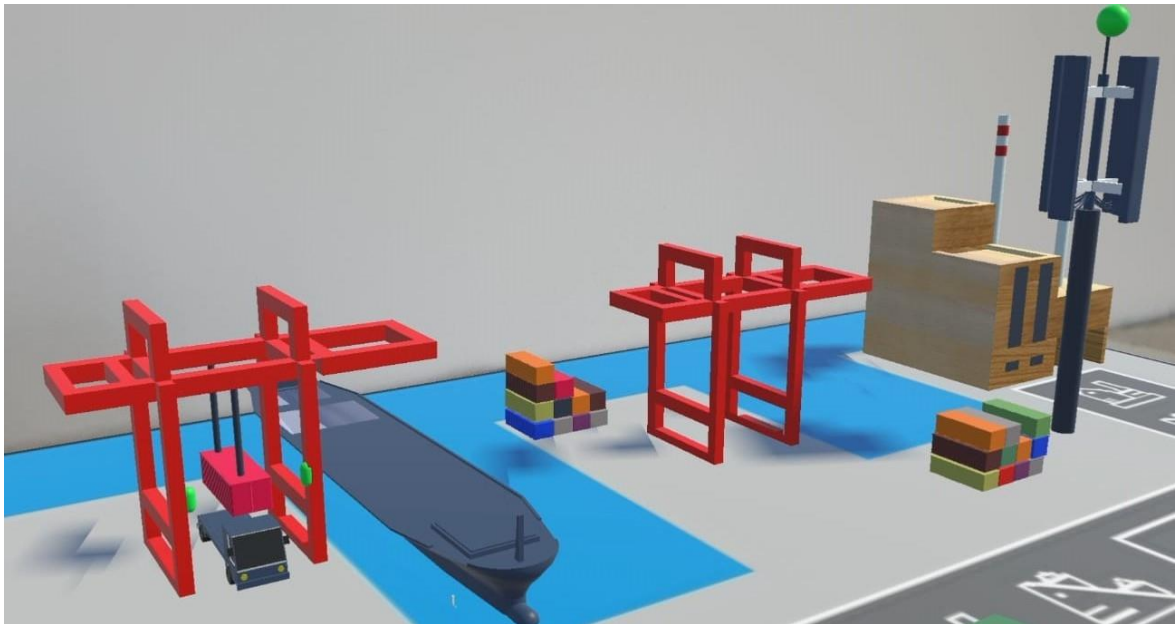
Slika 22. Obavijest o sljedećem kamionu za ukrcaj

Komunikacija vozila i infrastrukture omogućuje precizno pozicioniranje kamiona za brži i sigurniji ukrcaj tereta. Senzori smanjuju rizik od oštećenja kamiona, tereta ili infrastrukture. Optimizirani proces utovara dovodi do smanjenja vremena provedenog u terminalu čime se povećava opća učinkovitost teretne luke. U projektu su senzori vizualizirani oblikom kapsule, postavljeni su na stupove kрана te su animirani na način da poprime zelenu boju kada vozilo zauzme pravilan položaj za ukrcaj. Senzori su vidljivi na slici 21. Također, V2I tehnologija omogućuje vozačima brzo prilagođavanje svoje rute na temelju stvarnih uvjeta, pridonoseći boljoj učinkovitosti i smanjenju potrošnje goriva.

U projektu „SmartPort“ se prikazuju još dva scenarija ukrcaja kamiona i to jedan ukrcaj na rampi (slika 23.) i jedan ukrcaj kontejnera pomoću kрана (slika 24.). Oba utovara su bazirana na međusobnoj komunikaciji kamiona i infrastrukture.



Slika 23. Scena ukrcaja kamiona na rampi



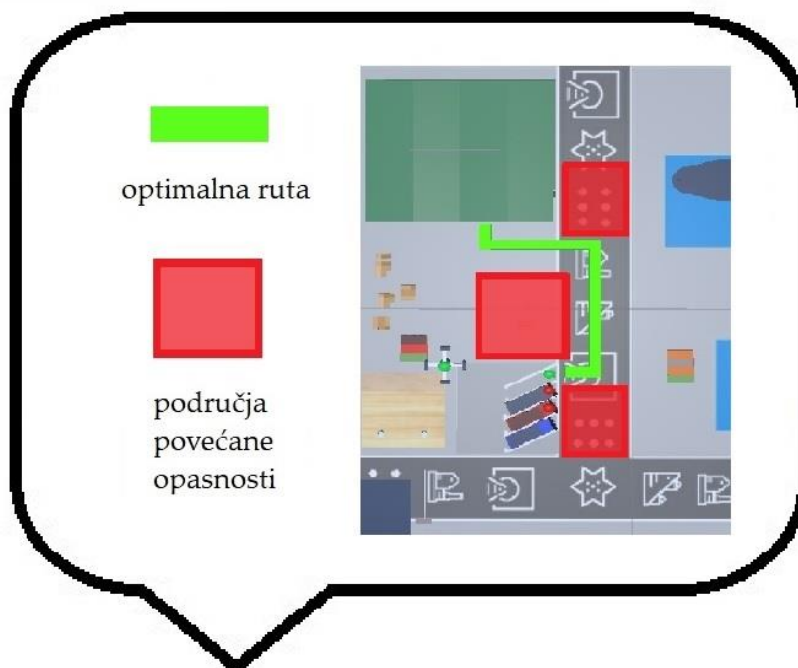
Slika 25. Scena ukrcaja kontejnera pomoću kрана

Na zaslonima vozila se prikazuju informacije o teretu čime se omogućuje jasno praćenje svakog koraka postupka (slika 25.). Informacije o teretu omogućuju precizno planiranje ukrcaja i iskrcaja te se putem takvog sučelja se mogu slati posebne upute za rukovanje teretom ako je potrebno čime bi se smanjila mogućnost oštećenja samog tereta. Sve informacije se dijele u stvarnom vremenu putem centralnog sustava, omogućavajući operaterima luke da prate napredak i interveniraju prema potrebi.

broj kamiona: 1691
broj naloga: 015638/2023
datum ukrcaja: 30.06.
adresa ukrcaja: XXX
datum iskrcaja: 02.07.
adresa iskrcaja: XXX
vrsta robe: igračke

Slika 24. Informacije o ukrcaju kamiona br. 1691

Na zaslonu vozila sa se prikazuje optimalna ruta do mjesta ukrcaja kao i područja povećane opasnosti (slika 26.). Obavijest označava područja povećane opasnosti zbog radova, mogućnih drugih prilaznih vozila, neadekvatno skladištene robe itd. Vozilo usklađuje vožnju prema preporučenim smjernicama, smanjujući rizik od nesreća ili oštećenja vozila.

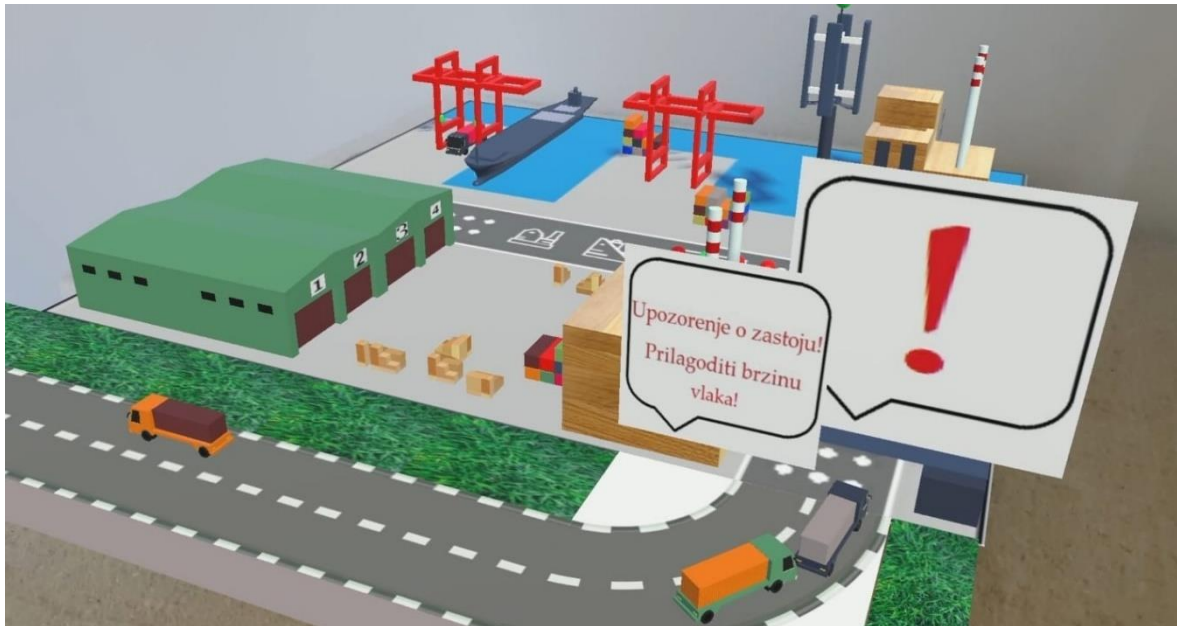


Slika 26. Prikaz optimalne rute kretanja vozila i područja povećanih opasnosti

Obavijest o područjima povećane opasnosti omogućava vozačima brze reakcije na opasna područja s obzirom da su pravodobno informirani. Operateri luke mogu brzo obavijestiti vozače o promjenama uvjeta unutar luke, osiguravajući koordiniranu vožnju. Upozorenja na opasnosti smanjuju mogućnost oštećenja tereta i infrastrukture.

Scenarij 3:

Treći scenarij prikazuje kamione koji putuju u cestovnom vlaku na određenom razmaku te vodeći kamion u vlaku prima obavijest prikazanu na slici 26. od infrastrukturnog elementa o zastoju na ulazu u luku. Slika 26. prikazuje zastoje na ulazu u luku.



Slika 27. Scena zastoja na ulazu u luku

Svaki kamion u cestovnom vlaku opremljen je sensorima i naprednim komunikacijskim tehnologijama koje omogućavaju neprekidno dijeljenje informacija, osiguravajući brze i precizne reakcije te smanjujući potencijalni rizik od sudara. Prvi kamion u vlaku automatski smanjuje brzinu te se obavijest o promjeni brzine prenosi kroz komunikacijsku mrežu pa svi kamioni prilagođavaju brzinu bez potrebe za ručnim upravljanjem.

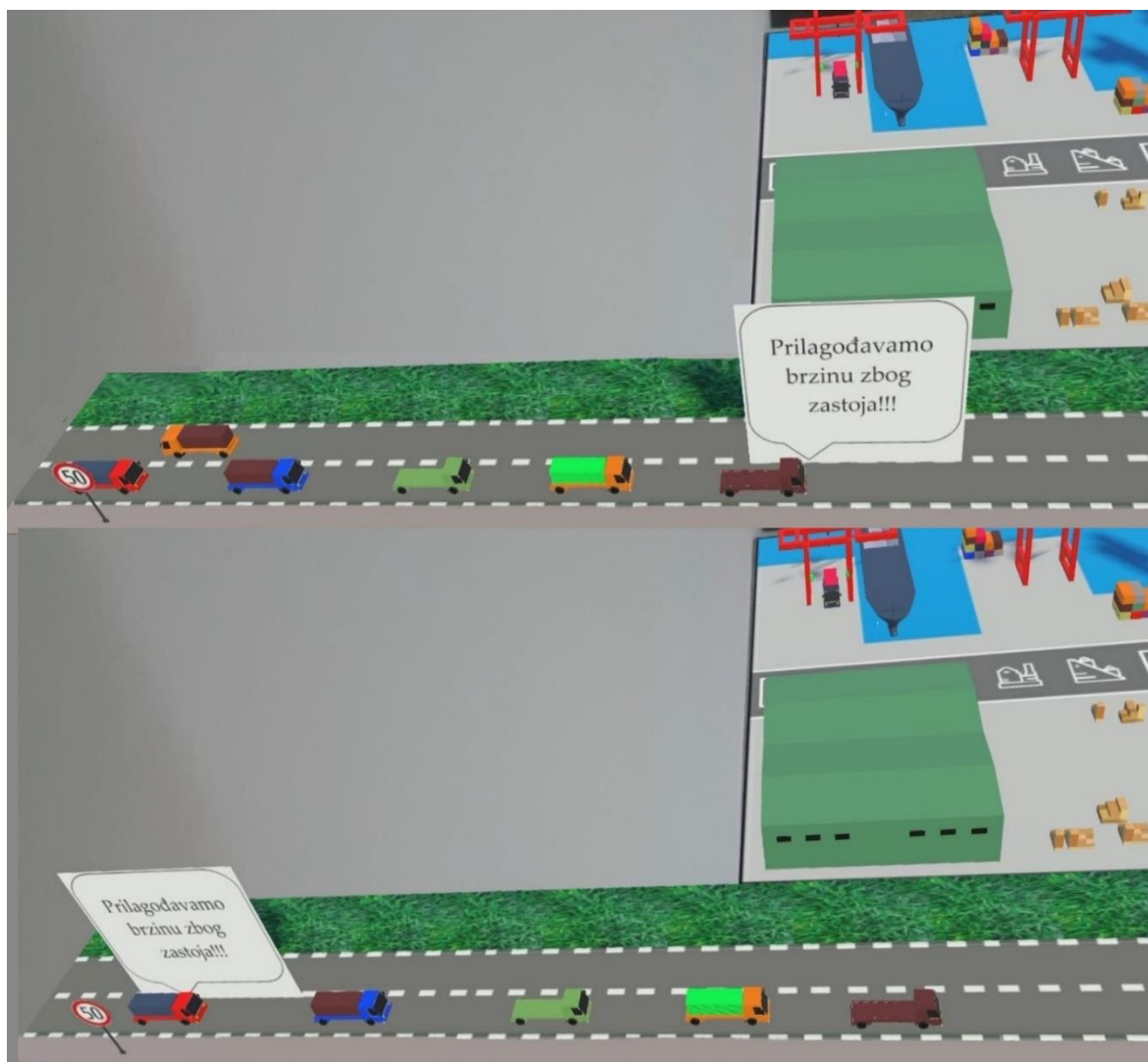
Prijenos obavijesti kroz komunikacijsku mrežu cestovnog vlaka prikazana je na slici 28. Slikom 27. vidljiva je scena iz programa Unity gdje se podaci šalju od prvog vozila prema zadnjem.



Slika 28. Prijenos podataka između vozila cestovnog vlaka teretnih vozila, [40]

Pojedinačna brzina vozila izračunava se prema formuli 3.2. na temelju položaja i brzine pojedinačnih vozila. Koordinirana komunikacija omogućuje trenutačno prilagođavanje brzine svih kamiona u cestovnom vlaku, minimizirajući

zastoje. Kamioni se brzo prilagođavaju promjenama osiguravajući kontinuiranu vožnju i prilagođenu brzinu čime se smanjuje potrošnja goriva te se povećava učinkovitost



Slika 29. Prikaz prijenosa informacija od vodećeg do zadnjeg kamiona u cestovnom vlaku

Svaki kamion u cestovnom vlaku opremljen je sensorima i naprednim komunikacijskim tehnologijama koje omogućavaju neprekidno dijeljenje informacija osiguravajući brze i precizne reakcije te smanjuju potencijalni rizik od sudara. Prvi kamion u vlaku automatski smanjuje brzinu te se obavijest o promjeni brzine prenosi kroz komunikacijsku mrežu pa svi kamioni prilagođavaju brzinu bez potrebe za ručnim upravljanjem. Prilagođavanjem brzine kamioni smanjuju vrijeme čekanja.

6. ZAKLJUČAK

Komunikacije V2I i V2V temeljne su tehnike za širenje podataka za aplikacije u vozilima, uključujući sigurnosne aplikacije poput širenja informacija u stvarnom vremenu o prometnim nesrećama, prometnim zagušenjima ili preprekama na cesti i aplikacije koje nisu povezane sa sigurnošću, poput ponude usluga s dodanom vrijednošću i usluge zabave u automobilu, no isključivo oslanjanje na V2I komunikacije ili same V2V komunikacije ne može zadovoljiti različite komunikacijske zahtjeve različitih aplikacija u vozilima.

Savjeti ograničenjima brzine u vozilu povećavaju učinkovitost upravljanja prometom s glavnim ciljem harmonizacije prometnog toka i izbjegavanjem prometnih zagušenja. To se postiže predlaganjem odgovarajuće brzine ograničenja uključujući V2I komunikaciju. Također, navedeni savjeti mogu se smatrati sigurnosnim činom s obzirom na to da smanjuju rizik od nezgode usklađivanjem prometnog toka i održavanjem brzina vozila blizu zakonskih. U sigurnosne činove se mogu svrstati i informacije o stanju ceste koje pomažu vozaču da se prilagodi istom.

U sklopu analize kooperativnih koncepata napravljena je 3D vizualizacija pametne luke primjenom proširene stvarnosti. Kroz scenarije ukrcaja i iskrcaja tereta, praćenja dostupnih parkirnih mjesta i koordinacije cestovnih vlakova teretnih vozila demonstrirana je razmjena informacija i komunikacija između vozila i infrastrukture te između vozila i vozila. 3D modeliranje omogućuje dublje razumijevanje, bolju vizualizaciju i analizu različitih aspekata logističkih operacija. Virtualni modeli stvaraju uvjete za lakše planiranje i projektiranje budućih projekata, olakšavaju obuku osoblja i simulaciju različitih scenarija te omogućuju vizualizaciju te analizu. Animacijama 3D modela pametne luke jasno i detaljno je prikazana interakcija između vozila i infrastrukturnih elemenata u prometnom okruženju te je poboljšano razumijevanje dinamičkih procesa komunikacije kao i identificiranje ključnih čimbenika koji utječu na sigurnost, efikasnost i koordinaciju prometa. Kroz animacije se uviđaju prednosti koje pruža optimizacija komunikacije vozila i infrastrukture u teretnoj luci. Koordinirana komunikacija i precizna navigacija dovode do smanjenja rizika i veće sigurnosti unutar teretne luke. Integracija informacija o teretu, vozilima i rutama omogućuju bolje iskorištavanje kapaciteta i resursa.

Odabirom optimalne rute smanjuje se vrijeme putovanja što uz točno planiranje vremena i mjesta ukrcaja doprinosi bržem i efikasnijem ispunjavanju zahtjeva. Optimizacija putovanja i resursa smanjuje potrošnju goriva i emisije štetnih plinova. Obavijesti o područjima povećane opasnosti omogućavaju vozačima pravovremene reakcije o potencijalno opasnim uvjetima čime se smanjuje rizik od prometnih nesreća, oštećenja tereta, vozila i infrastrukture. Koordinirana vožnja u cestovnom vlaku osigurava smanjenje zastoja i bolju iskorištenost vremena. Kao jedan od ciljeva rada treba spomenuti poticanje inovacije, razvoj naprednih prometnih rješenja te doprinos sigurnijem, učinkovitijem i održivijem prometnom okruženju.

LITERATURA

- [1] Domić I. Sustavi autonomne vožnje u automobilima. Završni rad. Istarsko veleučilište; 2021. Preuzeto sa:
<https://repositorij.iv.hr/islandora/object/politehnikapu:244/datastream/PDF/download> [Pristupljeno: svibanj,2023.]
- [2] Mandžuka S. Uvodna razmatranja. [Prezentacija] Inteligentni transportni sustavi I. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2022.
- [3] Grumert E. Cooperative Variable Speed Limit Systems - Modeling and Evaluation using Microscopic Traffic Simulation. Sweden: Department of Science and Technology. Linköping University; 2014. Preuzeto sa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:719820/FULLTEXT01.pdf> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]
- [4] Cooperative Urban Mobility. Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems. March 2010. Preuzeto sa: https://www.polisnetwork.eu/wp-content/uploads/2019/06/cvis-cooperative-urban-mobility_en_final-version-web.pdf [Pristupljeno: svibanj, 2023.]
- [5] LED-Mark ITS - intelligence for the Road, Preuzeto sa:
<https://ledmarkits.dk/applications/ghost-driver/?lang=en> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]
- [6] R. Q. Malik et al. Mapping and Deep Analysis of Vehicle-to-Infrastructure Communication Systems: Coherent Taxonomy, Datasets, Evaluation and Performance Measurements, Motivations, Open Challenges, Recommendations, and Methodological Aspects. IEEE Access. 2019;7:126753-126772. Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8758170> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]
- [7] Steven E. Shladover. Opportunities and Challenges in Cooperative Road Vehicle Automation. IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems. 2021;2:216-224.Preuzeto sa:
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9495943> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]
- [8] Hussein N. H, Yaw C. T, Koh S. P, Tiong S. K, Chong K. H. A Comprehensive Survey on Vehicular Networking: Communications, Applications, Challenges, and

Upcoming Research Directions. IEEE Access. 2022;10:86127-86180. Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9856630> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]

[9] Wymeersch H, de Campos Gabriel R, Falcone P, Svensson L, Ström Erik G. Challenges for cooperative ITS: Improving road safety through the integration of wireless communications, control, and positioning. 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 16-19 February 2015, Garden Grove, USA. IEEE; 2015. pp. 573-578.

Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7069408> [Pristupljeno: svibanj 2023.]

[10] Kanthavel D, Sangeetha S.K.B, Keerthana K.P. An empirical study of vehicle to infrastructure communications - An intense learning of smart infrastructure for safety and mobility. International Journal of Intelligent Networks. 2021;2:77-82.

Preuzeto sa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666603021000105?via%3Dihub> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[11] Chan P. Vehicle-to-Infrastructure (V2I) ITS Standards for Project Managers. U.S. Department of Transportation Office of the Assistant Secretary for Research and Technology. Preuzeto sa:

<https://www.pcb.its.dot.gov/StandardsTraining/mod43/ppt/m43ppt.pdf>

[Pristupljeno: svibanj, 2023.]

[12] Wenxue H, Huafu L, Zhi X, Xinghua L, Zhang J, Hou Q, LI Y. Overview of V2V and V2I Wireless Communication for Cooperative Vehicle Infrastructure Systems. IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 20-22 December 2019, Chengdu, China, IEEE; 2019. pp. 127-134. Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8997786> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]

[13] Meireles R, Rodrigues A, Stanciu A, Aguiar A, Steenkiste P. Exploring Wi-Fi Network Diversity for Vehicle-To-Infrastructure Communication. 2020 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 16-18 December 2020, New York, USA.

IEE; 2021 pp. 1-8. Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9318407>

[Pristupljeno: lipanj, 2023.]

- [14] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Preuzeto sa: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=472>
[Pristupljeno: srpanj, 2023.]
- [15] Zeadally S, Guerrero J, Contreras J. A tutorial survey on vehicle-to-vehicle communications. *Telecommunication Systems*. 2020;73:469–489. Preuzeto sa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11235-019-00639-8> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [16] Demba A, Möller D. Vehicle-to-Vehicle Communication Technology. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, 03-05 May 2018, Rochester, USA. IEEE; 2018. pp. 0459-0464. Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8500189> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [17] Kušić K, Ivanjko E, Gregurić M, Miletić M. An Overview of Reinforcement Learning Methods for Variable Speed Limit Control. *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4917 Preuzeto sa: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/4917>
[Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [18] Autorizirana predavanja. Mandžuka S. Inteligentni sustavi informiranja putnika i vozača. kolegij: Inteligentni transportni sustavi I. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti. 2022.
- [19] ISARSOFT. What are Variable Message Signs (VMS)?. Preuzeto sa: <https://www.isarsoft.com/knowledge-hub/vms-variable-message-signs>
[Pristupljeno: srpanj, 2023.]
- [20] Data Europa EU. RDS-TMC Location Table and Event List. Preuzeto sa: <https://data.europa.eu/data/datasets/https-data-norge-no-node-495?locale=en>
[Pristupljeno: srpanj, 2023.]
- [21] Vujić M. Inteligentno upravljanje prometnih tokova regulacijom ograničenja brzine. [Prezentacija] Cestovna telematika. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. 2023.
- [22] Sisiopiku Virginia P. Variable speed control: Technologies and practice. *Proceedings of the 11th Annual Meeting of ITS America*. 2001. Preuzeto sa: https://www.academia.edu/17363574/Variable_speed_control_Technologies_and_practice [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

- [23] Strnad I, Marsetič R. Differential Evolution Based Numerical Variable Speed Limit Control Method with a Non-Equilibrium Traffic Model. *Mathematics*. 2023; 11(2):265. Preuzeto sa: <https://doi.org/10.3390/math11020265> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [24] HAK. Upravljanje brzinom u zemljama u EU. Preuzeto sa: <https://www.hak.hr/datoteka/1051/upravljanje-brzinom-u-zemljama-eu.pdf> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [25] Wang M, Daamen W, Hoogendoorn Serge P, van Arem B. Connected variable speed limits control and car-following control with vehicle-infrastructure communication to resolve stop-and-go waves. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2016;20(6):559-572 Preuzeto sa: <http://dx.doi.org/10.1080/15472450.2016.1157022> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [26] Sadat M, Celikoglu Himli B. Simulation-based Variable Speed Limit Systems Modelling: An Overview and A Case Study on Istanbul Freeways. *Transportation Research Procedia*. 2017;22:607-614 Preuzeto sa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517301874?via%3Dihub> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [27] Bharadiya J. Artificial Intelligence in Transportation Systems A Critical Review. *American Journal of Computing and Engineering*. 6(1):34 - 45. Preuzeto sa: <https://ajpojournals.org/journals/index.php/AJCE/article/view/1487> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [28] Fu S, Wenhong L, Ge J, QU Y. Review on the application of freeway CVIS communication technology. *MATEC Web of Conferences*. 2020;325:01006. Preuzeto sa: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2020/21/mateconf_ictle2020_01006/mateconf_ictle2020_01006.html [Pristupljeno: lipanj, 2023.]
- [29] MarketWatch. This report focuses on the Automotive V2V / V2I Technologies market size at a CAGR of 5.7% from 2023 to 2030. Preuzeto sa: <https://www.marketwatch.com/press-release/this-report-focuses-on-the-automotive-v2v-v2i-technologies-market-size-at-a-cagr-of-57-from-2023-to-2030-2023-06-02> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[30] MarketWatch. The future development of the OBU (On Board Unit) market will be influenced by market size, trends, and the industry's compound annual growth rate 11% CAGR from 2023 to 2030. Preuzeto sa:

<https://www.marketwatch.com/press-release/the-future-development-of-the-obu-on-board-unit-market-will-be-influenced-by-market-size-trends-and-the-industrys-compound-annual-growth-rate-11-cagr-from-2023-to-2030-2023-05-31>

[Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[31] MarketWatch. Road Side Unit (RSU) Market Research, 2030. Preuzeto sa:

<https://www.marketwatch.com/press-release/road-side-unit-rsu-market-research-2030-2023-05-23> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[32] MarketWatch. 2030, Road Side Unit (RSU) Market Size | Industry Report 2023. Preuzeto sa: <https://www.marketwatch.com/press-release/2030-road-side-unit-rsu-market-size-industry-report-2023-2023-06-15> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[33] Ndao A, Djoko-Kouam M, Fougères Alain J. Matrix Beaconing for the Location of Autonomous Industrial Vehicles on a Simulation Platform. 3rd International Conference on Advances in Signal Processing and Artificial Intelligence (ASPAAI' 2020), 17-19 November 2021, Porto, Portugal. 2022.

[34] Abosuliman Shougi S, Almagrabi Alaa O. Routing and scheduling of intelligent autonomous vehicles in industrial logistics systems. *Soft Comput.* 2021;25:11975–11988 Preuzeto sa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-021-05633-4#citeas> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[35] Caterpillar. 500+ Autonomous Trucks Operating Worldwide With Cat Command for Hauling. Preuzeto sa:

<https://www.caterpillar.com/en/news/caterpillarNews/2022/500-autonomous-trucks.html> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]

[36] APM TERMINALS. Automation and Safety Performance. Preuzeto sa:

<https://www.apmterminals.com/en/news/news-releases/2017/news/automation-and-safety-performance> [Pristupljeno: svibanj, 2023.]

[37] Bergenhem C, Hedin E, Skarin D. Vehicle-to-Vehicle Communication for a Platooning System. *Procedia - Social and Behavioral Sciences.* 2012;48:1222-1233. Preuzeto sa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812028340?via%3Dihub> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[38] Bergenhem C, Pettersson H, Coelingh E, Englund C, Shladover S, Tsugawa S. OVERVIEW OF PLATOONING SYSTEMS. Chalmers Publication Library. 19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 22-26 October 2012. Preuzeto sa: <https://core.ac.uk/download/pdf/70599503.pdf> [Pristupljeno: lipanj, 2023.]

[39] Lauer M. Grand Cooperative Driving Challenge 2011. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. 2011:38-40. Preuzeto sa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5992861> [Pristupljeno: kolovoz, 2023.]

[40] Janssen R, Zwijnenberg H, Blankers I, de Kruijff J. Truck Platooning – driving for the future of transportation. Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO). Report No. TNO 2014 R11893. Preuzeto sa: <http://publications.tno.nl/publication/34616035/dLljFM/janssen-2015-truck.pdf> [Pristupljeno: kolovoz, 2023.]

POPIS KRATICA

ITS	Inteligentni transportni sustavi
VANET	(Vehicular Ad hoc Networks) mreža koja se sastoji od grupa pokretnih i nepokretnih vozila povezanih bežičnom mrežom
V2V	(Vehicle to Vehicle) vozilo s vozilom
V2I	(Vehicle to Infrastructure) vozilo s infrastrukturom
I2V	(Infrastructure to Vehicle) infrastruktura s vozilom
V2X	(Vehicle to X) vozilo sa svime
VRU	(Vulnerable road users) ranjivi sudionici u prometu, većinom pješaci, motocikli, biciklisti, djeca i starije osobe
V2U	(Vehicle to Users) vozilo s ostalim korisnicima
V2P	(Vehicle to Pedestrian) vozilo s pješakom
V2D	(Vehicle to Device) vozilo s uređajem
V2C	(Vehicle to Cloud) vozilo s oblakom
V2N	(Vehicle to Network) vozilo s mrežom
V2E	(Vehicle to Environment) vozilo s okolišem
V2R	(Vehicle to Road) vozilo s cestom
ICT	(Information and Communication Technology) informacijska i komunikacijska tehnologija
CVIS	(Cooperative Vehicle - Infrastructure System) kooperativni sustav vozila i infrastrukture
RSU	(Road side unit) cestovna ITS postaja
OBU	(On-board unit) ITS postaja u vozilu
GPS	(Global Positioning System) globalni sustav pozicioniranja
HMI	(Human-Machine Interface) sučelje vozila i čovjeka
GIS	(Geographic Information System) geografski informacijski sustav
FRADAR	(Radio Detection And Ranging) radar za radio detekciju i domet
WLAN	(Wireless local area network) bežična lokalna mreža

DSRC	(Dedicated Short Range Communication) namjenska komunikacija kratkog dometa
IEEE	(Institute of Electrical and Electronics Engineers) Institut inženjera elektrotehnike i elektronike
ODI	(On-Trip Driver Information) putno informiranje vozača
RDS	(Radio Data System) sustav radijskih podataka
TMC	(Traffic Message Channel) kanal prometnih poruka
GSM	(Global System for Mobile Communications) najrašireniji je svjetski standard za mobilnu telefoniju
GPRS	(General Packet Radio Service) paketna, bežična podatkovna komunikacijska usluga
UMTS	(Universal Mobile Telecommunications System) univerzalni mobilni telekomunikacijski sustav
PDA	(Personal Digital Assistant) osobni digitalni asistent
VSLC	(Variable Speed Limit Control) varijabilno oraničenje brzine
C-SLC	(Cooperative Speed Limit Control) kooperativno ograničenje brzine
AI	(Artificial intelligence) umjetna inteligencija
ML	(Machine Learning) strojno učenje
CAGR	(Compound Annual Growth Rate) složena godišnja stopa rasta
USD	(UD dollar) Američki dolar
AIV	(Autonomous industrial vehicle) autonomna industrijska vozila
NFC	(Near Field Communication) komunikacija kratkog dometa
IoT	(Internet of Things) Internet stvari
AGV	(Automated Guided Vehicles) automatizirana vođena vozila
GCDC	(Grand Cooperative Driving Challenge) velik izazov kooperativne vožnje
AR	(Augmented Reality) proširena stvarnost

POPIS SLIKA

Slika 1. V2X komunikacija	4
Slika 2. Opća arhitektura za komunikaciju između vozila i infrastrukture, [10]	11
Slika 3. ITS postaja uz prometnicu, RSU, [11].....	12
Slika 4. ITS postaja u vozilu, OBU, [11].....	13
Slika 5. Interna arhitektura V2V čvora (vozila) u V2V okruženju, [15]	17
Slika 6. Položaj detektora na kolniku, [21].....	20
Slika 7. Smanjivanje brzine za harmonizaciju prometnog toka, [21]	22
Slika 8. Shematski prikaz procesa kooperativne kontrole ograničenja brzine, [25]	25
Slika 9. Princip rada kooperativne kontrole ograničenja brzine, [3]	26
Slika 10. Cestovni vlak projekta SARTRE, [38]	38
Slika 11. GCDC predstavljanje scenarija cestovnih vlakova, [39].....	39
Slika 12. Prikaz modela pametne luke u Blenderu	43
Slika 13. Podloga za pozicioniranje modela	44
Slika 14. Scena s modelima iz Blendera u Unity-u	45
Slika 15. Hijerarhija projekta "SmartPort"	46
Slika 16. Materijali korišteni u projektu "SmartPort"	48
Slika 17. Prikaz scenarija 1. iz Unity-a i obavijest o vremenu i mjestu ukrcaja	49
Slika 18. Prikaz parkirališne površine unutar luke	50
Slika 19. Prikaz scenarija 1. s Android uređaja i obavijest o slobodnim parkirnim mjestima i ograničenju brzine unutar luke	50
Slika 20. Informacije o teretu kamiona br. 678	51
Slika 21. Optimalna ruta putovanja vozila i očekivano vrijeme dolaska na odredište	52
Slika 22. Obavijest o sljedećem kamionu za ukrcaj.....	52
Slika 23. Scena ukrcaja kamiona na rampi.....	53
Slika 24. Informacije o ukrcaju kamiona br. 1691	54
Slika 25. Scena ukrcaja kontejnera pomoću kрана.....	54
Slika 26. Prikaz optimalne rute kretanja vozila i područja povećanih opasnosti ...	55
Slika 27. Scena zastoja na ulazu u luku	56

Slika 28. Prijenos podataka između vozila cestovnog vlaka teretnih vozila, [40]..	56
Slika 29. Prikaz prijena informacija od vodećeg do zadnjeg kamiona u cestovnom vlaku.....	57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled značajki četiri sustava cestovnog vlaka, [38]	40
--	----

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Složena godišnja stopa rasta tržišta V2V i V2I tehnologije od 2016. do 2028. godine, [29].....	30
Grafikon 2. Složena godišnja stopa rasta tržišta ITS postaje u vozilu, OBU od 2016. do 2028. godine, [30].....	32

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

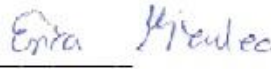
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ **diplomski rad**
(vrsta rada)

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Analiza primjene kooperativnog koncepta za optimizaciju prometne mreže, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 11.09.2023.

Erika Mikulec 
(ime i prezime, potpis)