

ULOGA MULTIMODALNOG FIZIČKOG I VIRTUELNOG SAOBRAĆAJNOG SIMULATORA U NAUČNIM ISTRAŽIVANJIMA

Marko Vukojević^{1*}, Milan Knežević¹, dr Ismet Goksad Erdagi², dr Aleksandar Stevanović¹

¹ University of Pittsburgh, mav299@pitt.edu, mik296@pitt.edu, stevanovic@pitt.edu

² AECOM, goksad.erdagi@aecom.com

Rezime: Razumevanje međusobnih interakcija različitih učesnika u saobraćaju predstavlja ključni preduslov za razvoj efikasnih multimodalnih saobraćajnih politika. Simulatori vožnje, pešaka i biciklista se široko primenjuju u saobraćajnim istraživanjima radi evaluacije inženjerskih mera i proučavanja ponašanja učesnika u kontrolisanim eksperimentalnim uslovima. Međutim, ovakvi sistemi se najčešće koriste izolovano, dok su integrisane platforme koje omogućavaju istovremenu interakciju vozača, biciklista i pešaka u virtuelnom okruženju i dalje veoma retke. U ovom radu prikazana je sinteza istraživanja sprovedenih na Univerzitetu u Pittsburgu, sa ciljem da se ilustruje kako integrisani multimodalni simulator može da podrži različite istraživačke ciljeve u oblasti saobraćajnog inženjerstva. Rad ilustruje istraživački potencijal ovakvih platformi kroz četiri studije slučaja koje obuhvataju teoriju saobraćajnog toka, ponašanje biciklista, analizu konflikata i istraživanje energetske efikasnosti saobraćaja.

Ključne reči: *Multimodalni Simulator, CARLA, PTV Vissim, Virtuelna Realnost.*

THE ROLE OF THE MULTIMODAL PHYSICAL AND VIRTUAL TRAFFIC SIMULATOR IN SCIENTIFIC RESEARCH

Marko Vukojevic^{1*}, Milan Knezevic¹, Dr. Ismet Goksad Erdagi², Dr. Aleksandar Stevanovic¹

¹ University of Pittsburgh, mav299@pitt.edu, mik296@pitt.edu, stevanovic@pitt.edu

² AECOM, goksad.erdagi@aecom.com

Abstract: Understanding interactions among different road users is essential for developing effective multimodal transportation policies. Driving, pedestrian, and bicycle simulators are widely used in transportation research to evaluate engineering applications and test human behavior under controlled and repeatable conditions. However, these simulators are typically employed in isolation, and integrated multimodal platforms that allow drivers, bicyclists, and pedestrians to interact within a virtual environment are limited. This paper presents a synthesis of research conducted at the Pittsburgh Intelligent Transportation Systems Laboratory, demonstrating how an integrated multimodal human-in-the-loop traffic simulation framework can support diverse transportation research objectives, including advancements in traffic theory, insights into bicyclist behavior, novel approaches to traffic conflict analysis, and emerging applications in energy research through distributed testing capabilities.

Key Words: *Multimodal Simulator, CARLA, PTV Vissim, Virtual Reality.*

1. UVOD

Simulatori vožnje su prepoznati u saobraćajnim istraživanjima još od ranih šezdesetih godina 20. veka [1], sa ciljem da se ispita ponašanje vozača i testiraju različite inženjerske mere u kontrolisanim eksperimentalnim uslovima [2], [3], [4]. Tokom vremena razvijene su različite hardverske arhitekture simulatora, počevši od jednostavnih sistema sa malim ekranima, preko konfiguracija sa više povezanih računarskih monitora i projekcionih sistema, pa sve do savremenih okruženja zasnovanih na tehnologiji virtuelne realnosti (VR).

Sa razvojem VR tehnologije i mogućnošću potpune percepcije trodimenzionalnog okruženja u simulaciji, stvoreni su ključni uslovi za testiranje naprednih sistema pomoći vozaču (u literaturi poznatih kao *Advanced Driver Assistance Systems – ADAS*). Među najpoznatijim istraživačkim platformama izdvajaju se simulator Univerziteta u Ajovi [5], simulator Univerziteta u Minesoti [6], simulator švedskog nacionalnog instituta za puteve i transport VTI [7], kao i simulator Univerziteta u Lidsu [8].

Pored istraživanja ponašanja vozača, napredak simulacionih tehnologija omogućio je i razvoj eksperimenata koji uključuju ranjive učesnike u saobraćaju. Prvi naučni radovi koji koriste biciklističke simulatore kao alat u istraživanju pojavljuju se krajem devedesetih godina 20. veka [9]. Dalji razvoj VR tehnologije omogućio je laboratorijama da unaprede realizam eksperimenata pružajući biciklistima potpunu percepciju okruženja kroz 360° virtuelno okruženje [10], [11].

* Autor zadužen za korespondenciju: mav299@pitt.edu

Sličan razvojni put zabeležen je i u istraživanjima ponašanja pešaka. Uz primenu VR tehnologije, kontrolera za kretanje i različitih sistema za praćenje pokreta, pešački simulatori postali su značajan alat za proučavanje ponašanja pešaka u saobraćaju, pri čemu jedan od prvih radova u ovoj oblasti datira još iz 1995. godine [12]. Arhitektura i kompleksnost pešačkih simulatora razlikuju se među istraživačkim laboratorijama, naročito u pogledu načina kontrole kretanja pešaka unutar simulacije. U pojedinim sistemima koriste se jednostavni džojstik kontroleri koji omogućavaju osnovne longitudinalne i lateralne promene pozicije [13], dok napredniji sistemi koriste senzore za praćenje kretanja u eksperimentalnoj prostoriji [14], ili sofisticirane sisteme za praćenje pokreta ekstremiteta i glave koji omogućavaju realističnu animaciju kretanja pešaka u virtuelnom okruženju [15]. Takođe, u literaturi se može pronaći podela pešačkih simulatora prema tipu vizuelizacije, od tzv. virtuelnih „pećina“ sa projekcionim sistemima do sistema zasnovanih na VR naočarima koje omogućavaju potpunu percepciju trodimenzionalnog okruženja [16].

Iako vozački, biciklistički i pešački simulatori postaju sve češći alat u saobraćajnim istraživanjima, ograničenja u pogledu opreme, finansijskih resursa i tehnoloških mogućnosti sprečavaju mnoge istraživačke laboratorije da istovremeno ispituju interakcije između različitih učesnika u saobraćaju unutar jedinstvene simulacije. Jedna od prvih inicijativa za povezivanje više simulatora predstavljena je u radu Paza i saradnika [17], gde je putem LAN mreže i *Common Object Request Broker* arhitekture omogućena interoperabilnost pešaka, bicikliste i vozača u jednoj simulaciji. U kasnijim istraživanjima razvijeni su različiti pristupi povezivanju simulatora. Lindner i saradnici [18] povezali su vozački i biciklistički simulator kako bi istražili interakcije između biciklista i autonomnih vozila. Woodside i saradnici [19] analizirali su ponašanje vozača i biciklista na raskrsnicama sa znakom stop kroz eksperimente sprovedene u povezanom simulatorskom okruženju. Lyu i saradnici [20] koristili su distribuiranu simulaciju sa pešakom i vozačem kako bi ispitali ponašanje pešaka na pešačkim prelazima u scenarijima mešovitog saobraćaja sa autonomnim i konvencionalnim vozilima. Slične scenarije interakcije pešaka i vozača na nesignalisanim raskrsnicama analizirali su Kalantari i saradnici [21].

Dalji razvoj simulacionih sistema doveo je do pojave naprednih multikorisničkih i distribuiranih simulacionih platformi. Ramlall i saradnici [22] razvili su povezani multikorisnički vozački simulator sa sinhronizovanim prikupljanjem EEG signala u cilju istraživanja ljudskih faktora i kognitivnih procesa tokom vožnje. Takođe, pojedine istraživačke grupe razvile su kompleksne softversko-hardverske arhitekture koje povezuju više simulatora, simulacionih platformi i geografski distribuiranih laboratorija. Hasan i saradnici [23] predstavili su arhitekturu distribuiranog testiranja koja povezuje četiri pešaka i jednog vozača kroz ko-simulaciju platformi Paramics, PTV Vissim i Unity. Huang i saradnici [24] predstavili su platformu „Sky-Drive“, namenjenu multimodalnoj simulaciji sa ljudima (u literaturi poznato pod *human-in-the-loop* simulacija), koja integriše više simulacionih komponenti i koncepte *Digital Twin* tehnologije.

U savremenim saobraćajnim istraživanjima simulatorski sistemi se koriste za različite istraživačke ciljeve. U tom kontekstu, integrisani multimodalni simulatorski sistemi omogućavaju istraživačima da u istom eksperimentalnom okruženju analiziraju različite aspekte saobraćajnog sistema. Cilj ovog rada je da predstavi sintezu eksperimenata sprovedenih u laboratoriji za inteligentne transportne sisteme Univerziteta u Pisburghu (u nastavku *PITTS laboratoriji*) i demonstrira potencijal integrisanog multimodalnog simulatorskog sistema za različite istraživačke pravce u saobraćajnom inženjerstvu. Kroz četiri studije slučaja prikazana su istraživanja koja obuhvataju: primenu LiDAR senzora za prikupljanje podataka i rekonstrukciju parametara saobraćajnog toka, analizu ponašanja biciklista, analizu konflikata između biciklista i vozača u *Digital Twin* okruženju, kao i distribuirano testiranje sistema sa ciljem unapređenja energetske efikasnosti saobraćaja. Ključni doprinos ovog rada nije samo prikaz pojedinačnih studija, već demonstracija kako jedinstvena multimodalna simulatorska platforma omogućava integrisano istraživanje više međusobno povezanih aspekata saobraćajnog sistema u okviru jedinstvenog eksperimentalnog okruženja.

Nakon uvodnog dela, poglavlje „**Multimodalna Simulatorska Platforma**“ opisuje hardversko-softversku arhitekturu platforme i metodologiju razvoja *Digital Twin* tehnologije realnog saobraćajnog koridora. U poglavlju „**Studije slučaja**“ dat je sažet prikaz četiri eksperimentalna istraživanja sprovedena u okviru ovog sistema. Završno poglavlje sumira ključne pouke i diskutuje potencijal multimodalnih simulatorskih platformi za buduća istraživanja u oblasti saobraćajnog inženjerstva.

2. MULTIMODALNA SIMULATORSKA PLATFORMA

Multimodalnu simulatorsku platformu razvili su Erdagi i Stevanović, a njen koncept, arhitektura i inicijalna validacija predstavljeni su u radu [25]. U tom istraživanju sistem je korišćen za ispitivanje interakcija između vozača, pešaka i biciklista uz prikupljanje fizioloških podataka učesnika u eksperimentu. Rezultati su pokazali značajan potencijal ovakvog pristupa za proučavanje stresa i ponašanja različitih učesnika u saobraćaju u kontrolisanim eksperimentalnim uslovima. Nakon inicijalne validacije, platforma je korišćena u više istraživačkih projekata i eksperimenata, a rezultati su predstavljeni u međunarodnim časopisima i na međunarodnim i regionalnim konferencijama [26], [27]. Razvijena simulatorska platforma zasniva se na konceptu *human-in-the-loop* simulacije u kojoj su fizički simulatori vozača, bicikliste i pešaka integrisani sa mikrosimulacionim modelom saobraćaja i virtuelnim okruženjem.

2.1. Hardver konfiguracija

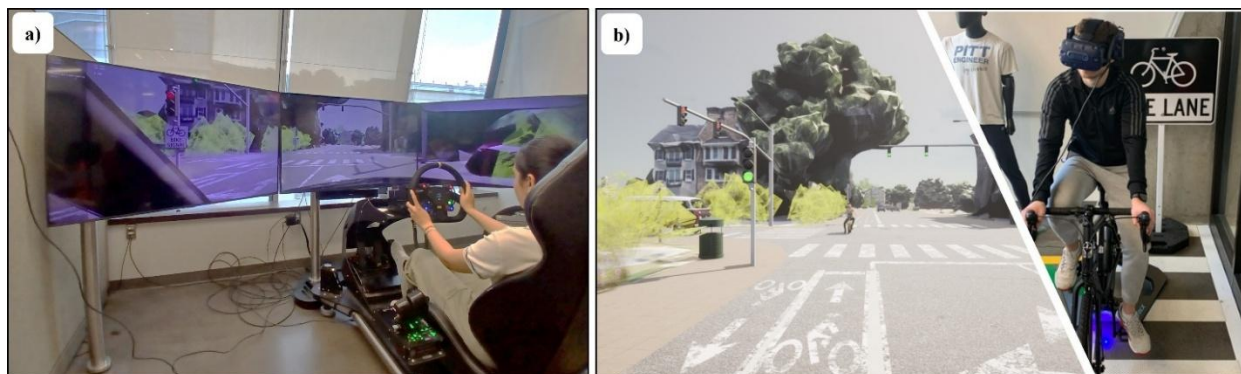
Hardverska konfiguracija sistema obuhvata tri podsistema: simulator vožnje, biciklistički simulator i pešački simulator. Sva tri podsistema povezana su sa centralnim računarom koji ima ulogu serverske jedinice i obavlja sve ključne računarske operacije tokom izvođenja eksperimenata.

Centralni računar opremljen je sa 32 GB RAM memorije, NVIDIA GeForce RTX 3070 grafičkom karticom sa 8 GB VRAM memorije i Intel® Core™ i7-10700 procesorom. Ova konfiguracija omogućava stabilno izvršavanje simulacija i renderovanje virtuelnog okruženja visoke rezolucije u realnom vremenu.

Simulator vožnje predstavljen na slici 1 (a), sastoji se od vizuelnog sistema sa tri 55-inčna ekrana koji omogućavaju široko periferno vidno polje za vozača. Mehanička struktura simulatora uključuje Sparco Chrono sedište, Cube Controls GT Pro Momo volan i Fanatec ClubSport V3 papučice za gas, kočnicu i kvačilo. Sistem je montiran na D-BOX pokretnu platformu sa aktuatorima hoda 1.5 inča, koja omogućava tri stepena slobode kretanja (nagib, rotacija i vertikalno pomeranje). Pokreti platforme sinhronizovani su sa virtuelnim vozilom, čime se postiže realistična simulacija ubrzanja, kočenja i lateralnih dinamika vozila.

Biciklistički simulator prikazan na slici 1 (b) sastoji se od standardnog bicikla montiranog na Tacx Neo 2T pametni točak za trening koji u realnom vremenu očitava brzinu i ubrzanje bicikla i prenosi podatke centralnom računarom putem Bluetooth veze. Promena ugla upravljača detektuje se pomoću uređaja Elite Sterzo koji je takođe povezan sa centralnim računarom. Dodatno, na upravljaču bicikla instalirano je dugme koje služi kao signal kočenja i omogućava sistemu da registruje usporavanje bicikliste. Biciklistički simulator može se integrisati sa VR naočarima kako bi učesnik imao potpunu percepciju trodimenzionalnog okruženja. Kako bi se omogućilo potpuno uranjanje u virtuelno okruženje, sistem koristi HTC Vive VR naočare koje pružaju percepciju 360° trodimenzionalnog okruženja.

Hardverska konfiguracija pešačkog simulatora razlikuje se od prethodna dva podsistema. Sistem se primarno zasniva na VR naočarima i dva kontrolera koji omogućavaju upravljanje virtuelnim avатарom. Levi kontroler koristi se za kretanje pešaka napred, dok desni kontroler omogućava rotaciju avatara oko vertikalne ose. Alternativno, pešak se može kretati na pokretnoj traci ili slobodnim kretanjem u fizičkom prostoru uz pomoć sistema za praćenje pokreta. S obzirom na to da su studije slučaja u ovom radu fokusirane na interakcije vozača i bicikliste, eksperimenti sa pešacima još uvek su u fazi razvoja, te će buduća istraživanja detaljnije obraditi ovu komponentu sistema.



Slika 1. Vozački simulator (a) i Biciklistički simulator (b)
 Izvor: Autori

2.2. Softverska konfiguracija

Softverska konfiguracija sistema zasniva se na integraciji CARLA simulacionog okruženja i PTV Vissim mikrosimulacije saobraćaja. Ova integracija omogućava istovremeno testiranje ponašanja učesnika u saobraćaju i simulaciju saobraćajnog toka u pozadini. Pored toga, u PITTS laboratoriji razvijena je metodologija za testiranje saobraćajnih scenarija iz realnog okruženja kroz koncept *Digital Twin* tehnologije.

2.2.1. Simulaciono okruženje

CARLA (Car Learning to Act) [28] predstavlja *open-source* simulaciono okruženje, razvijeno na Univerzitetu u Barseloni, sa ciljem testiranja saobraćajnih situacija iz realnog sveta u virtuelnom okruženju. Pored mogućnosti izvođenja eksperimenata sa ljudima u virtuelnoj realnosti, CARLA sadrži različite tipove senzora koji služe kao podrška testiranju tehnologija autonomnih i konektovanih vozila.

Postoje dva osnovna pristupa korišćenju CARLA simulacije. Prvi pristup podrazumeva korišćenje već razvijenih simulacionih mapa koje predstavljaju hipotetičke gradove i standardne biblioteke objekata i funkcionalnosti koje se mogu kontrolisati putem Python API interfejsa. Drugi pristup podrazumeva pristup izvornom kodu CARLA simulacije i razvoj prilagođenog simulacionog okruženja u okviru *Unreal Engine* platforme. Ovakav pristup omogućava istraživačima veću fleksibilnost u dizajnu eksperimenata, uključujući: 1) kreiranje novih mapa, što je u PITTS laboratoriji iskorišćeno za razvoj *Digital Twin* modela realnog koridora; 2) kreiranje novih agenata u simulaciji, poput VR agenata; 3) implementaciju dodatnih funkcionalnosti, na primer sistema za praćenje pokreta očiju (*eye-tracking*); i/ili 4) razvoj dodatnih eksperimentalnih funkcija korišćenjem C++ i Python API interfejsa.

PTV Vissim 2025 predstavlja široko korišćen softver za mikrosimulaciono modeliranje saobraćaja [29]. Vissim omogućava realističnu simulaciju kretanja saobraćaja u pozadini, koristeći različite modele ponašanja vozača i vozila. Jedna od važnih karakteristika Vissim softvera jeste mogućnost povezivanja sa naprednim kontrolerima rada svetlosne signalizacije. Na taj način, svetlosni signali u simulaciji mogu biti kontrolisani pomoću virtuelnih kontrolera identičnih onima koji se koriste u realnim saobraćajnim sistemima [30], [31]. Pored toga, Python API i COM interfejs u Vissimu omogućavaju razvoj različitih eksperimentalnih konfiguracija i potpunu kontrolu nad simulacionim scenarijima, što je naročito važno u istraživanjima gde je potrebno izolovati spoljašnje faktore i obezbediti visoku ponovljivost eksperimenata. CARLA simulaciono okruženje može se povezati sa drugim mikrosimulacionim platformama, poput SUMO ili Aimsun simulacije, kao i sa agent-based modelima razvijenim u okruženjima kao što su MATLAB ili NetLogo.

2.2.1. *Digital Twin* metodologija

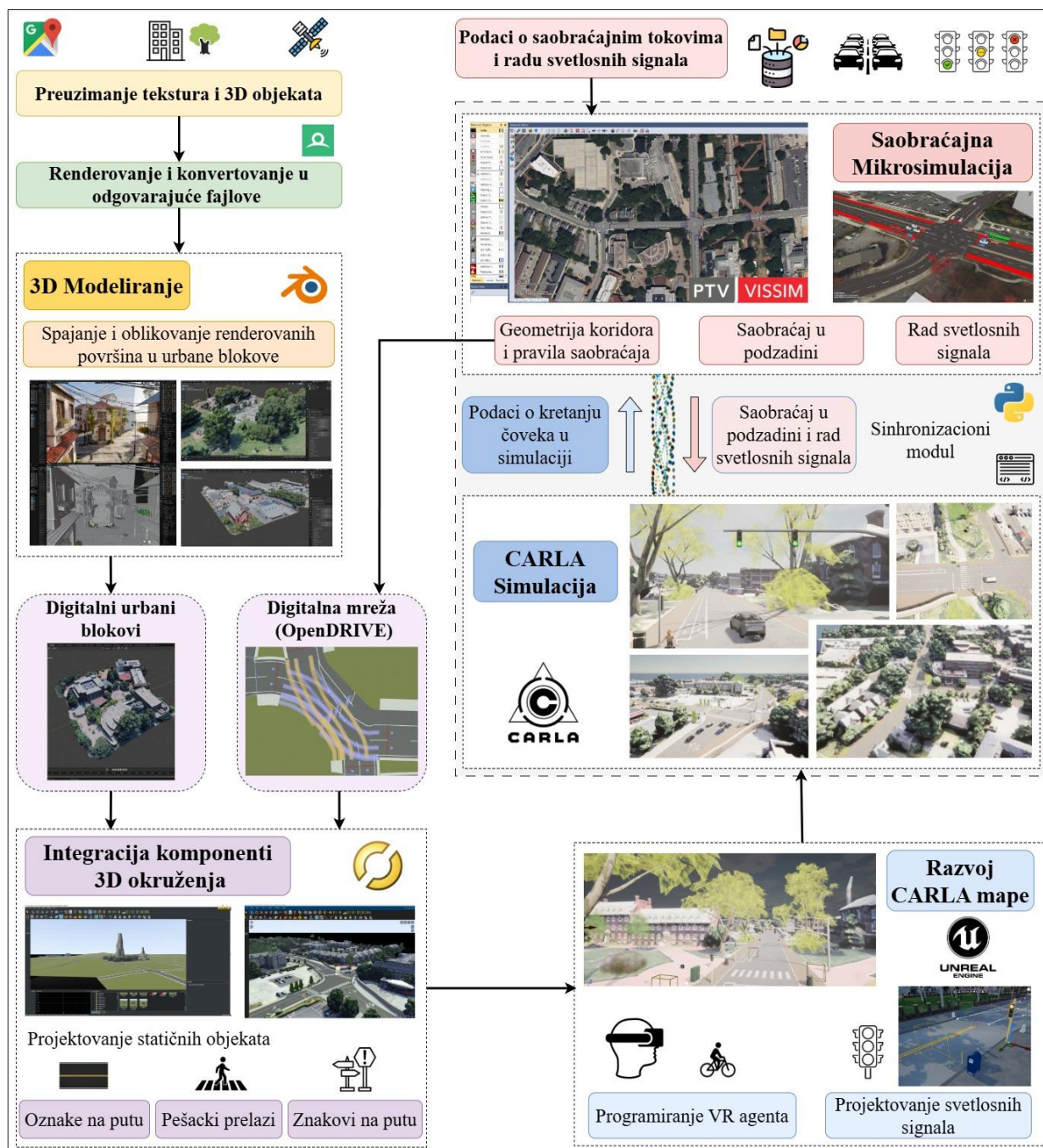
Razvoj digitalne replike saobraćajnog koridora, u literaturi poznate kao *Digital Twin*, sastoji se od više tehničkih koraka. Dijagram metodologije, procesa protoka podataka, prikazan je na slici 3. Metodologija je objašnjena kroz primer razvijen na koridoru Delaware Avenue u Newarku, Delaware, SAD.

Saobraćajni mikrosimulacioni model: Polazna pretpostavka ove metodologije jeste postojanje razvijenog mikrosimulacionog modela posmatranog koridora. Model Delaware Avenue koridora sastoji se od devet signalizovanih raskrsnica. Koridor je jednosmeran u smeru zapad–istok i sastoji se od dve saobraćajne trake, uz biciklističku stazu sa leve strane u smeru kretanja. Takođe, koridor je projektovan sa savremenim sistemom upravljanja svetlosnom signalizacijom koji uključuje posebne faze za bicikliste i pešake. Geometrija koridora i saobraćajna pravila eksportovani su u standardizovani *OpenDRIVE* fajl koji predstavlja digitalni opis saobraćajne mreže. Ovaj fajl sadrži ključne informacije koje definišu kretanje vozila generisanih u mikrosimulacionom modelu.

CARLA simulacija: CARLA mapa razvijena je kao trodimenzionalna digitalna replika posmatranog koridora. Proces razvoja 3D okruženja obuhvata sledeće korake:

- 1) Prikupljanje i renderovanje 3D tekstura i objekata: Okruženje koridora preuzeto je sa *Google Maps* platforme (*satellite view*) korišćenjem *RenderDoc* softvera (verzija 1.2).
- 2) 3D modeliranje: Preuzete površine i objekti obrađeni su u *Blender* softveru (verzija 4.1) kako bi se formirali urbani blokovi i eksportovali u *.fbx* format.
- 3) Integracija 3D komponenti: Korišćenjem *RoadRunner* softvera (*MathWorks*), *OpenDRIVE* mreža eksportovana iz *Vissim* modela integrisana je sa 3D objektima kreiranim u *Blenderu*. U ovom koraku dodati su i statični objekti poput pešačkih prelaza, saobraćajnih znakova i ostale infrastrukture.

- 4) Kreiranje CARLA mape: Integrisani 3D model (.fbx) i *OpenDRIVE* fajl koriste se kao ulazni podaci za kreiranje CARLA mape u *Unreal Engine* okruženju (verzija 4.26). *OpenDRIVE* fajl definiše saobraćajnu mrežu i moguće rute kretanja vozila u simulaciji. U ovom koraku implementirani su i objekti svetlosne signalizacije koji omogućavaju sinhronizaciju sa Vissim simulacijom. Rezultat ovog procesa je CARLA simulaciona aplikacija koridora Delaware Avenue (verzija 0.9.15).
- 5) CARLA – PTV Vissim sinhronizacija: Kako bi se omogućila interakcija između učesnika koje kontrolišu ljudi i saobraćaja generisanog u Vissim mikrosimulaciji, razvijen je modul za sinhronizaciju zasnovan na Python programskom jeziku. Ovaj modul u realnom vremenu prenosi podatke o radu svetlosne signalizacije iz Vissim simulacije u CARLA okruženje. Istovremeno, uz pomoć *DrivingSimulatorProxy.dll* modula, Vissim šalje osnovne informacije o vozilima generisanim u mikrosimulaciji, dok prima podatke o vozilima, biciklistima ili pešacima koje kontrolišu učesnici u virtuelnom okruženju.



Slika 2. Metodologija dizajniranja Digital Twin koridora
Izvor: Autori

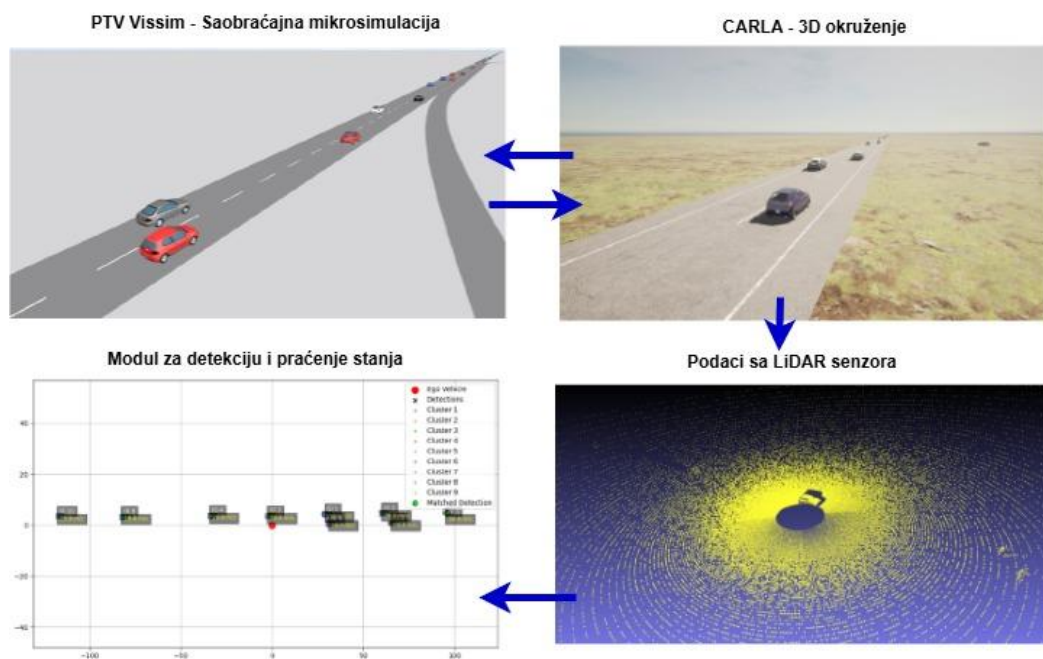
3. Studije Slučaja

Kako bi se ilustrovale istraživačke mogućnosti razvijene multimodalne simulatorske platforme, u nastavku su predstavljene četiri studije slučaja koje obuhvataju različite oblasti saobraćajnog inženjerstva: teoriju saobraćajnog toka, ponašanje učesnika u saobraćaju, bezbednosne interakcije i energetska efikasnost saobraćaja.

3.1. Rekonstrukcija makroskopskog saobraćaja korišćenjem LiDAR senzora

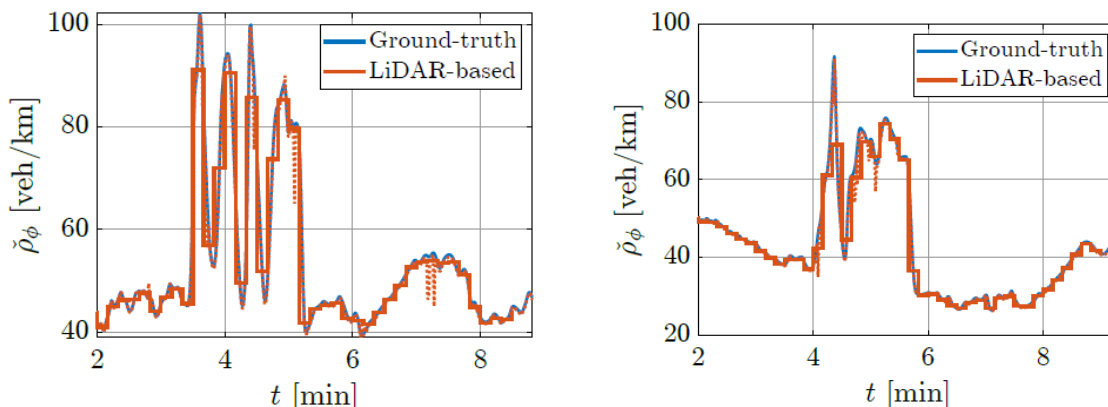
Softverski alati za mikrosimulaciju saobraćaja omogućavaju prikupljanje podataka o saobraćajnom toku radi evaluacije različitih scenarija. Ovi podaci mogu biti generisani „veštački“ unutar simulacije, na primer korišćenjem funkcija za evaluaciju saobraćaja poput *Node Evaluation* modula u softveru Vissim, ili simulacijom rada detektora na saobraćajnoj mreži. Prva studija slučaja ima za cilj da predstavi alternativni pristup prikupljanju podataka o saobraćaju korišćenjem senzora montiranih na vozilima u simulacionom okruženju CARLA. Ovaj pristup zasniva se na ideji da vozila opremljena naprednim sensorima, kakvi se danas koriste u autonomnim i konektovanim vozilima, mogu služiti kao pokretni senzori koji prikupljaju informacije o lokalnom stanju saobraćaja.

Prethodna istraživanja pokazala su potencijal LiDAR senzora za detekciju vozila i prikupljanje visokorezolucionih podataka o saobraćaju [32], [33]. U ovoj studiji LiDAR senzori se koriste kako bi vozila u simulaciji bila tretirana kao *Lagranž senzori*, odnosno pokretni senzori koji prate stanje saobraćaja duž svoje trajektorije. Eksperimenti su realizovani u simulacionom okruženju koje integriše mikrosimulacioni model saobraćaja, njegovu trodimenzionalnu reprezentaciju i vozački simulator, čime je omogućeno izvođenje *human-in-the-loop* eksperimenata. U okviru eksperimenta realizovana su tri ključna koraka: 1) vozilo kojim upravlja učesnik u VR okruženju opremljeno je LiDAR senzorom koji detektuje vozila u okolini i generiše podatke o njihovim pozicijama i kretanju; 2) detektovane trajektorije vozila koriste se za formiranje *Lagranž* merenja lokalnog saobraćajnog stanja; i 3) prikupljeni podaci koriste se kao ulaz u algoritam za rekonstrukciju makroskopskog stanja saobraćaja zasnovan na modelu saobraćajnog toka [34]. Na osnovu ovih podataka moguće je proceniti parametre saobraćajnog toka, kao što je gustina saobraćaja, čak i na delovima puta gde direktna merenja nisu dostupna.



Slika 3. Postupak prikupljanja podataka upotrebom LiDAR senzora
Izvor: dr Mladen Čičić, prezentovano na TRB godišnjoj konferenciji 2025. Godine

Primer rezultata rekonstrukcije gustine saobraćaja prikazan je na slici 4. Na slici su prikazane procene gustine saobraćaja zasnovane na LiDAR merenjima (crvena linija) i poređenje sa referentnim vrednostima dobijenim iz svih trajektorija vozila u simulaciji (plava linija). Dva prikazana primera odgovaraju scenarijima u kojima se vozilo opremljeno sensorima kretalo brzinom od 50 km/h i 70 km/h.



Slika 4. Gustine saobraćaja dobijene LiDAR Lagranž pristupom (crvena linija) i referentnih vrednosti dobijenih iz trajektorija vozila (plava linija). Levo je primer za brzinu od 50 km/h, a desno za 70 km/h.
Izvor: dr Mladen Čičić, prezentovano na TRB godišnjoj konferenciji 2025. godine

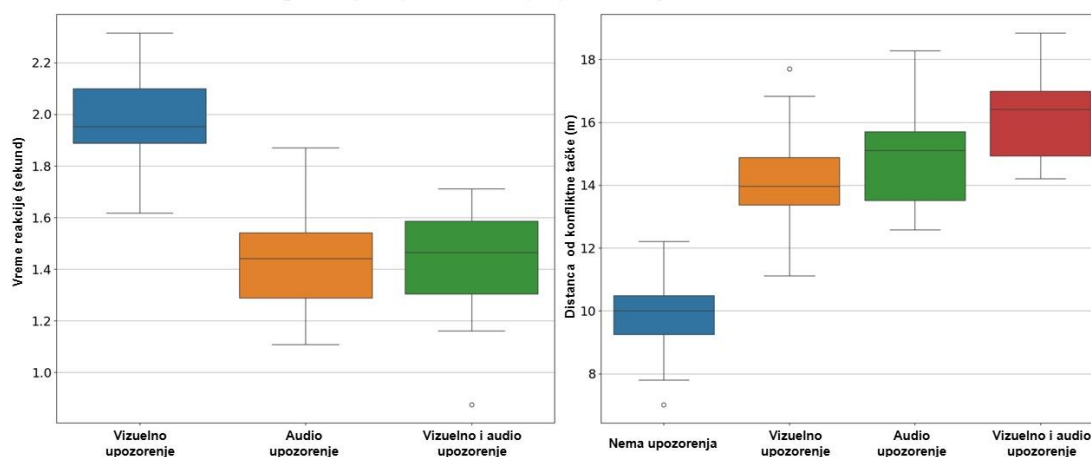
Rezultati pokazuju da LiDAR-bazirani *Lagranž* pristup može relativno precizno rekonstruisati lokalno stanje saobraćaja koristeći ograničeni skup podataka prikupljenih sa vozila u pokretu. Ova studija slučaja ilustruje kako multimodalna simulatorska platforma može da posluži kao eksperimentalno okruženje za istraživanje novih metoda prikupljanja podataka i procene stanja saobraćaja.

3.2. Ispitivanje ponašanja biciklista u VR simulaciji

Sistemi za upozorenje na potencijalne konfliktne situacije (*Collision Warning Systems*) postaju sve značajniji u istraživanjima bezbednosti biciklista u urbanom saobraćaju. Cilj ove studije slučaja bio je da se ispita uticaj različitih prototipa upozorenja na reakciju biciklista u konfliktnim situacijama na signalizovanim raskrsnicama. Eksperimenti su sprovedeni u integrisanom CARLA–Vissim simulacionom okruženju. Učesnici su upravljali biciklom u VR okruženju, dok su vozila u simulaciji kontrolisana mikrosimulacionim modelom u Vissimu.

Eksperimentalni koridor sastoji se od osam hipotetičkih raskrsnica. Vozila iz suprotnog smera bila su programirana da skreću ulevo u trenutku kada se biciklista nalazi približno pet sekundi udaljen od konfliktne zone, čime se simulira potencijalna konfliktna situacija između vozila i bicikliste.

Eksperimenti su imali za cilj da ispituju reakciju biciklista u četiri različita scenarija: 1) scenario bez upozorenja; 2) scenario sa vizuelnim upozorenjem; 3) scenario sa audio upozorenjem; i 4) scenario sa kombinovanim audio-vizuelnim upozorenjem. Glavne analizirane metrike bile su vreme reakcije bicikliste i distanca između tačke zaustavljanja bicikliste i konfliktne tačke. Rezultati su prikazani na slici 5.



Slika 5. Vreme reakcije biciklista (levo) i distanca zaustavljanja (desno) u različitim scenarijima upozorenja
Izvor: [26]

Eksperimenti su sprovedeni kroz 25 ponavljanja rute, a rezultati pokazuju da su audio upozorenja dovela do najkraćih vremena reakcije, dok su kombinovana audio-vizuelna upozorenja rezultovala zaustavljanjem

biciklista na najvećim distancama od konfliktne tačke. Rezultati su u skladu sa prethodnim sličnim istraživanjima [35], gde je dokazano da audio upozorenja često omogućavaju bržu reakciju biciklista. Rezultati ove studije sugerišu da sistemi za upozorenje namenjeni biciklistima treba da uključe audio ili kombinovane audio-vizuelne signale kako bi se postigla veća bezbednost u konfliktnim situacijama. Takođe, VR simulacija se pokazala kao pogodna eksperimentalna platforma za proučavanje ponašanja biciklista u kontrolisanim uslovima i otkrića predstavljaju osnovu za naredna istraživanja, konkretno, studiju slučaja 3.

3.3. Analiza konflikata između biciklista i vozača u 'Digital Twin' simulaciji

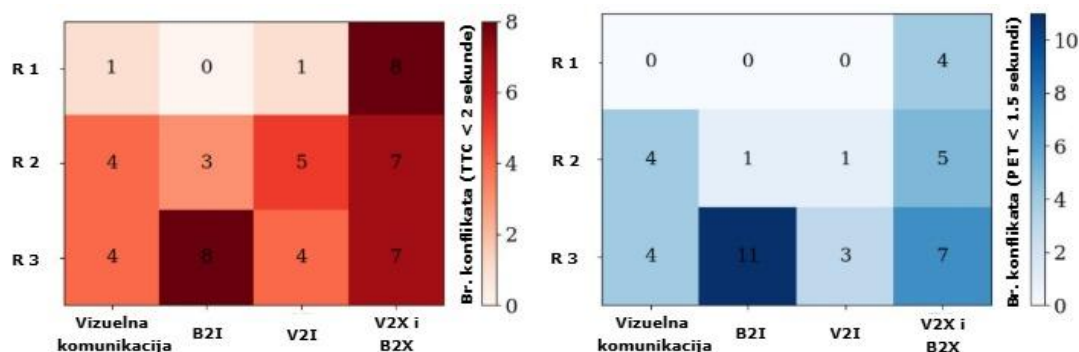
Prva istraživanja saobraćajnih konflikata zasnivala su se na direktnim terenskim posmatranjima interakcija između učesnika u saobraćaju [36]. Razvojem video tehnologije omogućena je analiza konflikata putem snimaka saobraćaja [37], dok su savremenije metode, zasnovane na *computer vision* algoritmima, omogućile automatsku detekciju konflikata iz video zapisa [38].

Sa razvojem simulacionih alata, mikrosimulacije su postale značajan instrument za analizu saobraćajne bezbednosti. Jedan od najpoznatijih alata je *Surrogate Safety Assessment Model (SSAM)* [39], koji koristi trajektorije vozila za identifikaciju potencijalnih konflikata. Međutim, postavlja se pitanje u kojoj meri matematički modeli ponašanja mogu realno da reprodukuju kompleksne interakcije između različitih učesnika u saobraćaju. Iz tog razloga, upotreba simulatorskih sistema sa učesnicima koji aktivno upravljaju vozilima ili drugim sredstvima u simulaciji (*human-in-the-loop* eksperimenti) postaje sve popularniji pristup [40], [41], [42].

Prethodne studije konflikata između biciklista i vozila u povezanom saobraćajnom okruženju uglavnom su analizirale situacije u kojima jedan učesnik predstavlja čovek, dok je drugi agent kontrolisan od strane simulacionog modela [43], [44], [45], [46]. Zbog toga je cilj ove studije slučaja bio da analizira konflikte između dva agenta kojima upravljaju ljudi, odnosno između vozača i bicikliste koji se istovremeno nalaze u istoj simulaciji. Eksperimenti su realizovani u *Digital Twin* okruženju koje predstavlja digitalnu repliku realnog koridora Delaware Avenue, predstavljenog u prethodnom poglavlju.

Eksperimentalna postavka razvijena je u integrisanom CARLA–Vissim simulacionom okruženju, pri čemu su oba učesnika eksperimenta (vozač i biciklista) istovremeno učestvovala u istoj simulaciji. Učesnicima su dodeljene unapred definisane rute koje su ih vodile ka tri konfliktne situacije duž koridora. Konfliktne situacije odabrane su tako da reprezentuju česte i potencijalno opasne scenarije interakcije između biciklista i vozila: 1) vozilo izlazi sa parking prostora pored puta i prelazi biciklističku stazu; 2) na dve signalisane raskrsnice vozilo skreće levo dok biciklista nastavlja pravo, gde oba učesnika imaju zeleno svetlo. U konfliktu drugog tipa, situacija je otežana činjenicom da vozač ima ograničenu vidljivost bicikliste zbog pojave slepe tačke vozila. Eksperimenti su realizovani u četiri različita scenarija komunikacije između učesnika uz prisustvo sistema za upozorenje na potencijalne konfliktne situacije: 1) bez komunikacije; 2) informacija se šalje samo biciklisti; 3) informacija se šalje samo vozaču; informacija se šalje i vozaču i biciklisti.

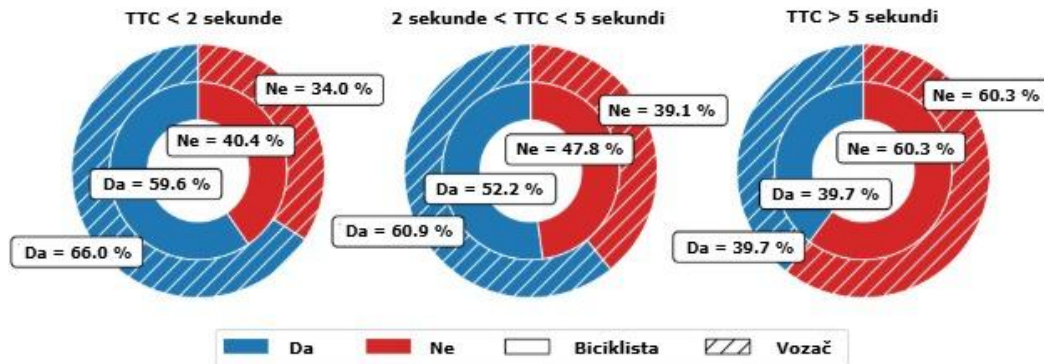
S obzirom na to da je u ovoj studiji po prvi put analizirana interakcija između dva čoveka u simulaciji, javlja se pitanje u kojoj meri se zabeležene interakcije mogu smatrati konfliktnim situacijama. Poseban izazov predstavlja činjenica da je potrebno sinhronizovati dolazak dva učesnika na konfliktno mesto u približno isto vreme. U ukupno 17 sprovedenih eksperimenata identifikacija konflikata izvršena je korišćenjem standardnih *surrogate safety* indikatora, pre svega *Time-to-Collision (TTC)* i *Post-Encroachment Time (PET)* [47], [48], [49]. Rezultati analize konflikata prikazani su na slici 6.



Slika 6. Broj konflikata prema različitim scenarijima komunikacije

Izvor: Autori

Kako bi se dodatno procenila realističnost identifikovanih konflikata, nakon svakog eksperimenta učesnici su odgovarali na pitanje da li su interakciju sa drugim učesnikom doživeli kao konfliktnu situaciju. Slika 7 prikazuje poređenje subjektivne percepcije konflikta i vrednosti TTC indikatora. Analiza je izvršena za tri kategorije: 1) $TTC < 2$ s predstavljajući ozbiljan konflikt; TTC između 2 i 5 s predstavljajući umeren konflikt; i TTC veći od 5 s sto predstavlja situaciju koja se obično ne smatra konfliktom.



Slika 7. Poređenje percepcije konflikta između biciklista i vozača u odnosu na TTC vrednosti
Izvor: Autori

3.4. Testiranje multikorisničke distribuirane simulacione arhitekture u istraživanju energetske efikasnosti

Ekološka vožnja (*eco-driving*) predstavlja skup strategija usmerenih ka smanjenju potrošnje goriva i emisije štetnih gasova kroz optimizaciju odluka vozača ili algoritama vozila, kao što su ubrzanje, usporavanje, izbor brzine i predikcija stanja saobraćaja [50]. U poslednjih nekoliko godina razvijen je veliki broj modela koji imaju za cilj optimizaciju potrošnje energije kod povezanih i autonomnih vozila [51]. Sa druge strane, istraživači u oblasti upravljanja saobraćajem razvili su brojne modele optimizacije rada svetlosnih signala sa ciljem smanjenja potrošnje goriva i emisije štetnih gasova [52], [53].

Međutim, jedno značajno istraživačko pitanje ostaje nedovoljno istraženo u dosadašnjoj literaturi: kakvi su efekti ovih modela kada funkcionišu nezavisno jedan od drugog u istom saobraćajnom sistemu. Drugim rečima, postavlja se pitanje kako se modeli optimizacije kretanja vozila i modeli optimizacije rada svetlosnih signala međusobno ponašaju kada se razvijaju i implementiraju od strane različitih zainteresovanih strana.

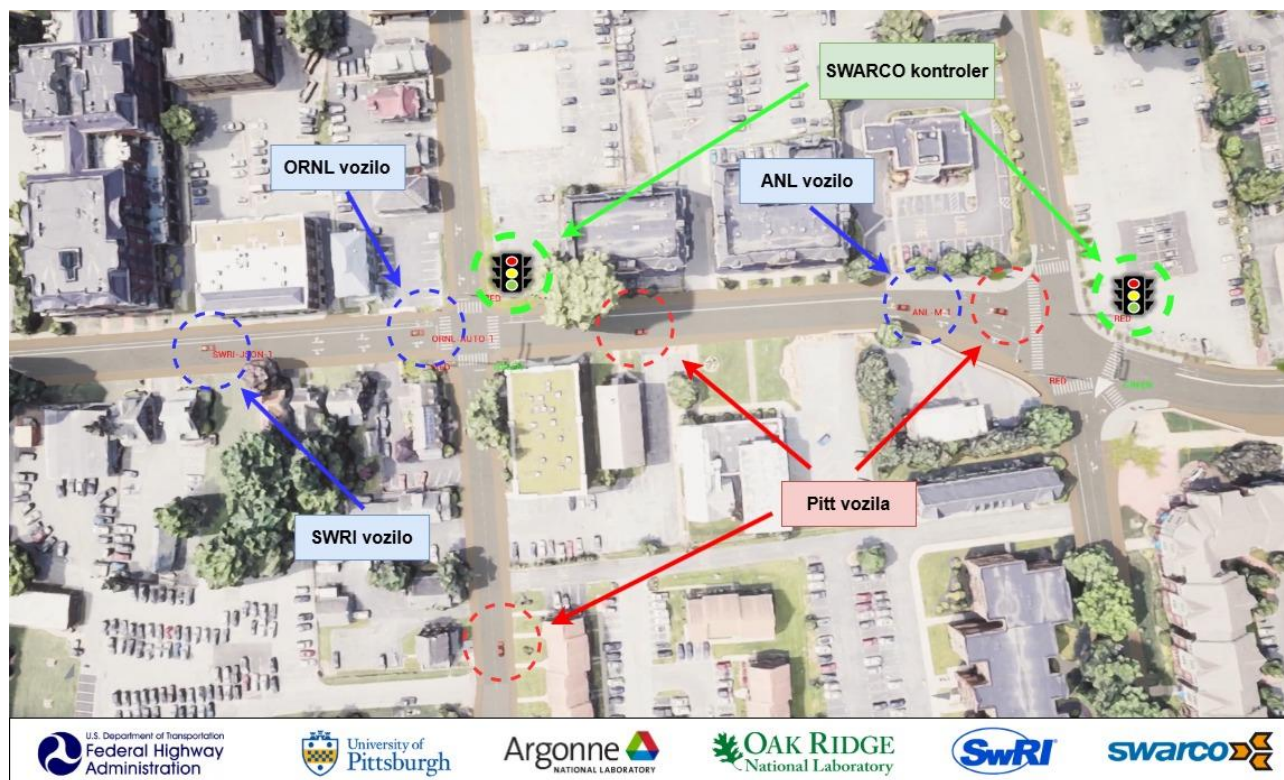
Za analizu ovakvih situacija neophodno je sprovesti eksperimente u softverskoj arhitekturi koja omogućava istovremeno testiranje više nezavisnih sistema u istom simulacionom okruženju. U tom cilju, Federalna administracija za puteve Sjedinjenih Američkih Država (*Federal Highway Administration – FHWA*) pokrenula je inicijativu za multikorisničko distribuirano testiranje, koje omogućava povezivanje više istraživačkih institucija i industrijskih partnera u jedinstveno simulaciono okruženje.

Cilj ove inicijative bio je ispitivanje energetske efikasnosti saobraćaja, odnosno analiza uticaja različitih modela ekološke vožnje i strategija upravljanja svetlosnim signalima na potrošnju energije. Kako bi se obezbedili realistični uslovi testiranja, eksperimenti su sprovedeni u *Digital Twin* tehnologiji realnog koridora, dok su različiti učesnici razvijali i testirali svoje modele u okviru distribuirane simulacione arhitekture. U testiranju su učestvovali sledeći partneri, sa jasno definisanim ulogama:

- Leidos – američka tehnološka kompanija koja je razvila softversku infrastrukturu za distribuirano testiranje i pružila tehničku podršku svim učesnicima u eksperimentu
- University of Pittsburgh – istraživačka institucija koja je obezbedila simulaciono okruženje *Digital Twin* realnog koridora i upravljala simulacijom saobraćaja u pozadini
- Argonne National Laboratory (ANL) – američka nacionalna laboratorija koja je razvila i testirala jedan model ekološke vožnje
- Oak Ridge National Laboratory (ORNL) – nacionalna laboratorija koja je razvila i testirala alternativni model optimizacije kretanja vozila
- Southwest Research Institute (SwRI) – neprofitni istraživački institut koji je implementirao i testirao treći model optimizacije kretanja vozila

- SWARCO – međunarodna kompanija specijalizovana za sisteme upravljanja saobraćajem, koja je obezbedila i kontrolisala modele upravljanja svetlosnim signalima, uključujući fiksni režim rada signala i adaptivno upravljanje u realnom vremenu.

Tehnički cilj eksperimenta bio je da svi učesnici funkcionišu u istom simulacionom okruženju zasnovanom na CARLA platformi. U simulaciji su istovremeno učestvovala tri autonomna vozila opremljena različitim modelima ekološke vožnje (ANL, ORNL i SwRI), vozila u pozadini generisana mikrosimulacionim modelom u softveru Vissim (University of Pittsburgh), kao i sistemi upravljanja svetlosnim signalima koje je obezbedila kompanija SWARCO. Slika 8 prikazuje primer izvođenja eksperimenta u CARLA simulacionom okruženju.



Slika 8. Multikorisničko distribuisano testiranje u akciji

Izvor: Autori

S obzirom na kompleksnost multikorisničke distribuirane arhitekture i uključivanje više nezavisnih sistema razvijenih od strane različitih institucija, primarni cilj ove studije slučaja nije bio kvantitativna evaluacija performansi pojedinačnih modela, već validacija mogućnosti njihove istovremene integracije i stabilnog funkcionisanja u jedinstvenom simulacionom okruženju. Rezultati inicijalnih testiranja pokazali su da je moguće uspešno sinhronizovati različite modele ekološke vožnje i sisteme upravljanja svetlosnom signalizacijom u realnom vremenu, uz održavanje stabilnosti sistema i kontinuirane razmene podataka između učesnika.

Ova studija predstavlja važan korak ka razvoju eksperimentalne platforme koja omogućava buduća sistemski istraživanja interakcije između vozila, infrastrukture i upravljačkih strategija u saobraćajnim sistemima. Kvantitativna analiza energetskih efekata različitih pristupa biće predmet budućih istraživanja.

4. ZAKLJUČAK

Razvoj naprednih simulacionih platformi značajno je proširio mogućnosti istraživanja u oblasti saobraćajnog inženjerstva. Integracija različitih simulacionih alata, virtualne realnosti i hardverskih simulatora omogućava istraživačima da u kontrolisanim uslovima analiziraju kompleksne interakcije između različitih učesnika u saobraćaju, kao i da testiraju nove tehnologije i inženjerske pristupe pre njihove implementacije u realnom okruženju.

U ovom radu predstavljen je multimodalni simulatorski sistem razvijen u Laboratoriji za inteligentne transportne sisteme Univerziteta u Pittsburghu, zajedno sa pregledom istraživačkih mogućnosti multimodalne platforme kroz četiri studije slučaja. Prva studija demonstrirala je potencijal LiDAR senzora za prikupljanje podataka o

saobraćaju i rekonstrukciju makroskopskog stanja saobraćajnog toka korišćenjem pristupa zasnovanog na Lagranzovim senzorima. Druga studija slučaja pokazala je kako VR-bazirani biciklistički simulator može poslužiti kao eksperimentalna platforma za istraživanje ponašanja biciklista i evaluaciju različitih sistema upozorenja u konfliktnim situacijama na raskrsnicama. Treća studija slučaja proširila je ovaj pristup analizom konflikata između vozača i bicikliste u „Digital Twin“ okruženju, pri čemu su oba učesnika bila kontrolisana od strane ljudi u istoj simulaciji. Rezultati su pokazali da je moguće identifikovati i analizirati realistične konfliktno situacije korišćenjem standardnih indikatora bezbednosti, kao što su TTC i PET, uz dodatnu validaciju kroz subjektivnu percepciju učesnika. Konačno, četvrta studija slučaja demonstrirala je mogućnosti multikorisničkog distribuiranog testiranja u istraživanju energetske efikasnosti saobraćaja, gde su različite istraživačke institucije i industrijski partneri simultano testirali modele ekološke vožnje i upravljanja svetlosnim signalima u zajedničkom simulacionom okruženju.

Rezultati predstavljenih studija slučaja ukazuju na to da integrisani multimodalni simulatorski sistemi mogu predstavljati značajnu istraživačku infrastrukturu za analizu različitih aspekata saobraćajnih sistema, uključujući prikupljanje podataka o saobraćaju, ponašanje učesnika u saobraćaju, bezbednosne interakcije i energetske efikasnosti transporta. Kombinovanjem mikrosimulacije, virtuelne realnosti i eksperimentalnih simulatora moguće je ostvariti visok nivo kontrole nad eksperimentalnim uslovima, uz istovremeno zadržavanje realističnosti scenarija. Rezultati takođe ukazuju na potrebu da se buduća istraživanja u ovoj oblasti razvijaju kroz multidisciplinarni i sistemski pristup, koji povezuje saobraćajno inženjerstvo, računarstvo, psihologiju ponašanja učesnika u saobraćaju. Integrisane simulatorske platforme omogućavaju istraživačima da istovremeno analiziraju tehničke, infrastrukturne i ljudske faktore u saobraćajnim sistemima, što predstavlja važan korak ka razumevanju kompleksnih interakcija između različitih učesnika u saobraćaju i novih tehnologija mobilnosti.

Buduća istraživanja mogu dodatno proširiti mogućnosti ovakvih platformi kroz integraciju novih tipova senzora, uključivanje pešaka u *human-in-the-loop* simulacije, kao i testiranje interakcija ranjivih učesnika u saobraćaju sa autonomnim vozilima. Takođe, značajan pravac razvoja predstavlja šira primena distribuiranih simulacionih arhitektura koje omogućavaju saradnju između više istraživačkih institucija u okviru zajedničkih eksperimentalnih okruženja, uz uključivanje većeg broja VR agenata i veći fokus na ranjive učesnike u saobraćaju.

Literatura

- [1] R. G. Mortimer, "Effect of low blood-alcohol concentrations in simulated day and night driving," *Percept. Mot. Skills*, vol. 17, pp. 399–408, 1963.
- [2] N. Merat and A. H. Jamson, "The effect of three low-cost engineering treatments on driver fatigue: A driving simulator study," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 50, pp. 8–15, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.aap.2012.09.017.
- [3] R. Ezzati Amini *et al.*, "Driver distraction and in-vehicle interventions: A driving simulator study on visual attention and driving performance," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 191, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.aap.2023.107195.
- [4] I. Zöller, B. Abendroth, and R. Bruder, "Driver behaviour validity in driving simulators – Analysis of the moment of initiation of braking at urban intersections," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 61, pp. 120–130, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.trf.2017.09.008.
- [5] Freeman, J. S. Watson, Y. E. Lin, T. C. Tayyab, A. Romano, and Kuhl, "The Iowa driving simulator: An implementation and application overview," *International Congress & Exposition*, no. SAE Technical Paper, Feb. 1995.
- [6] N. L. Morris, C. M. Craig, P. Easterlund, and J. Achtemeier, "Human-centered solutions to advanced roadway safety HumanFIRST Driving Simulation Educational Development." [Online]. Available: <http://www.roadwaysafety.umn.edu/publications/>
- [7] H. Antonson, S. Mårdh, M. Wiklund, and G. Blomqvist, "Effect of surrounding landscape on driving behaviour: A driving simulator study," *J. Environ. Psychol.*, vol. 29, no. 4, pp. 493–502, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.jenvp.2009.03.005.

- [8] İ. Öztürk, N. Merat, R. Rowe, and S. Fotios, "The effect of cognitive load on Detection-Response Task (DRT) performance during day- and night-time driving: A driving simulator study with young and older drivers," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 97, pp. 155–169, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.trf.2023.07.002.
- [9] H. A. H. C. Van Veen, H. K. Distler, S. J. Braun, and H. H. Biilthoff, "Navigating through a virtual city: Using virtual reality technology to study human action and perception *," ELSEVIER, 1998. [Online]. Available: <http://www.elsevier.nl/locate/>
- [10] P. Wintersberger, A. Matviienko, A. Schweidler, and F. Michahelles, "Development and Evaluation of a Motion-based VR Bicycle Simulator," *Proc. ACM Hum. Comput. Interact.*, vol. 6, no. MHCI, Sep. 2022, doi: 10.1145/3546745.
- [11] S. O'Hern, J. Oxley, and M. Stevenson, "Validation of a bicycle simulator for road safety research," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 100, pp. 53–58, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.aap.2017.01.002.
- [12] M. S. Martin Usoh and A. Steed, "Taking Steps: The Influence of a Walking Technique on Presence in Virtual Reality," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, vol. 2, no. 3, pp. 201–219, 1995, doi: 10.1145/210079.210084.
- [13] G. L. Savino *et al.*, "Comparing pedestrian navigation methods in virtual reality and real life," in *ICMI 2019 - Proceedings of the 2019 International Conference on Multimodal Interaction*, Association for Computing Machinery, Inc, Oct. 2019, pp. 16–25. doi: 10.1145/3340555.3353741.
- [14] S. Deb, D. W. Carruth, R. Sween, L. Strawderman, and T. M. Garrison, "Efficacy of virtual reality in pedestrian safety research," *Appl. Ergon.*, vol. 65, pp. 449–460, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2017.03.007.
- [15] S. M. Serrano, D. F. Llorca, I. G. Daza, and M. Á. S. Vázquez, "Realistic pedestrian behaviour in the CARLA simulator using VR and mocap," Sep. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2309.04418>
- [16] I. T. Feldstein, C. Lehsing, A. Dietrich, and K. Bengler, "Pedestrian simulators for traffic research: state of the art and future of a motion lab," *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, vol. 6, no. 4, 2018.
- [17] A. Paz, N. Veeramisti, R. Khaddar, H. De La Fuente-Mella, and L. Modorcea, "Traffic and driving simulator based on architecture of interactive motion," *Scientific World Journal*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/340576.
- [18] J. Lindner *et al.*, "A coupled driving simulator to investigate the interaction between bicycles and automated vehicles," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 1335–1341. doi: 10.1109/ITSC55140.2022.9922400.
- [19] J. Woodside, H. Jashami, D. S. Hurwitz, R. Young, and K. Chang, "Safety relevant driver and bicyclist behaviors resulting from bicycling rolling stops observed in a networked driving and bicycling simulator," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 166, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.trc.2024.104754.
- [20] W. Lyu *et al.*, "A distributed simulation study to investigate pedestrians' road-crossing decisions and head movements in response to different vehicle kinematics in mixed traffic," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 104, pp. 1–14, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.trf.2024.04.023.
- [21] A. H. Kalantari *et al.*, "Who goes first? a distributed simulator study of vehicle–pedestrian interaction," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 186, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.aap.2023.107050.
- [22] P. Ramlall, E. Jones, and S. Roy, "Development of a Networked Multi-Participant Driving Simulator with Synchronized EEG and Telemetry for Traffic Research," *Systems*, vol. 13, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.3390/systems13070564.

- [23] M. Hasan, D. Perez, Y. Shen, and H. Yang, "Distributed Microscopic Traffic Simulation with Human-in-the-Loop Enabled by Virtual Reality Technologies," *Advances in Engineering Software*, vol. 154, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.advengsoft.2021.102985.
- [24] Z. Huang *et al.*, "Sky-Drive: A Distributed Multi-Agent Simulation Platform for Human-AI Collaborative and Socially-Aware Future Transportation," May 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2504.18010>
- [25] I. G. Erdagi, S. Gavric, and A. Stevanovic, "Development of Multimodal Physical and Virtual Traffic Reality Simulation System," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 9, p. 5115, May 2025, doi: 10.3390/app15095115.
- [26] I. Goksad Erdagi and A. Stevanovic, "Effects of Auditory and Visual Warnings on Improvement of Effects of Auditory and Visual Warnings on Improvement of Bicycle Safety at Signalized Intersections Bicycle Safety at Signalized Intersections," *RSS2024, Lexington, Kentucky, USA October 28-31, 2024*, [Online]. Available: https://uknowledge.uky.edu/ktc_present
- [27] A. Stevanovic, M. Vukojevic, and I. G. Erdagi, "Investigating Impacts of Connected Vehicle Communications in Multimodal Environment Through High-Fidelity Virtual Reality Modeling," *International Scientific Conference New Horizons of Transport and Communications*, pp. 425–436, 2026, doi: 10.1007/978-3-032-14078-4_38.
- [28] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun, "CARLA: An Open Urban Driving Simulator," Nov. 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1711.03938>
- [29] C. U. Haas and A. W. Myers, "PTV Vissim 2025 User Manual," 2025.
- [30] I. G. Erdagi, S. Gavric, M. Vukojevic, and A. Stevanovic, "On-Demand All-Red Interval (ODAR): Evaluation and Implementation in Software-in-the-Loop Simulation," *Information (Switzerland)*, vol. 17, no. 2, Feb. 2026, doi: 10.3390/info17020142.
- [31] A. Stevanovic, J. Stevanovic, and P. T. Martin, "Optimizing signal timings from the field: VISGAOST and VISSIM?ASC/3 software-in-the-loop simulation," *Transp. Res. Rec.*, no. 2128, pp. 114–120, 2009, doi: 10.3141/2128-12.
- [32] W. Ma and S. Qian, "High-Resolution Traffic Sensing with Probe Autonomous Vehicles: A Data-Driven Approach", doi: 10.3390/s2.
- [33] F. Guan, H. Xu, and Y. Tian, "Evaluation of Roadside LiDAR-Based and Vision-Based Multi-Model All-Traffic Trajectory Data," *Sensors*, vol. 23, no. 12, Jun. 2023, doi: 10.3390/s23125377.
- [34] M. Čičić and K. H. Johansson, "Front-tracking transition system model for traffic state reconstruction, model learning, and control with application to stop-and-go wave dissipation," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 166, pp. 212–236, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.trb.2022.10.008.
- [35] F. Bella and M. Silvestri, "Effects of directional auditory and visual warnings at intersections on reaction times and speed reduction times," *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 51, pp. 88–102, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.trf.2017.09.006.
- [36] M. H. Zaki, T. Sayed, and K. Shaaban, "Use of drivers' jerk profiles in computer vision-based traffic safety evaluations," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2434, pp. 103–112, 2014, doi: 10.3141/2434-13.
- [37] A. Laureshyn and A. Várhelyi, "The Swedish Traffic Conflict Technique Observer's manual," 2018.
- [38] J. Li, Y. Liu, A. Tageldin, M. H. Zaki, G. Mori, and T. Sayed, "Automated region-based vehicle conflict detection using computer vision techniques," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2528, pp. 49–59, 2015, doi: 10.3141/2528-06.
- [39] D. Gettman, L. Pu, T. Sayed, and S. Shelby, "Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report," *Turner-Fairbank Highway Research Center*, no. FHWA-HRT-08-051, Jun. 2008.

- [40] C. N. Boda, M. Dozza, K. Bohman, P. Thalya, A. Larsson, and N. Lubbe, "Modelling how drivers respond to a bicyclist crossing their path at an intersection: How do test track and driving simulator compare?," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 111, pp. 238–250, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2017.11.032.
- [41] J. Warner, D. S. Hurwitz, C. M. Monsere, and K. Fleskes, "A simulator-based analysis of engineering treatments for right-hook bicycle crashes at signalized intersections," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 104, pp. 46–57, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.aap.2017.04.021.
- [42] K. Holländer, A. Colley, C. Mai, J. Häkkinä, F. Alt, and B. Pfleging, "Investigating the influence of external car displays on pedestrians' crossing behavior in virtual reality," in *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI 2019*, Association for Computing Machinery, Inc, Oct. 2019. doi: 10.1145/3338286.3340138.
- [43] Z. Xu, N. Zheng, D. B. Logan, and H. L. Vu, "Assessing bicycle-vehicle conflicts at urban intersections utilizing a VR integrated simulation approach," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 191, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.aap.2023.107194.
- [44] S. Winkler, J. Kazazi, and M. Vollrath, "Practice makes better – Learning effects of driving with a multi-stage collision warning," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 117, pp. 398–409, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.aap.2018.01.018.
- [45] T. Hirose, T. Takada, S. Oikawa, and Y. Matsui, "Validation of driver support system based on real-world bicycle and motor vehicle flows," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 156, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.aap.2021.106131.
- [46] S. Springer-Teumer, I. Kreißig, and J. F. Krems, "Anticipatory information makes the difference: Behavioral effects and user assessments of a cyclist warning system to enhance cyclists' situation awareness," *J. Safety Res.*, vol. 87, pp. 266–284, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jsr.2023.09.022.
- [47] K. Tang and M. Kuwahara, "Implementing the Concept of Critical Post-Encroachment Time for All-Red Clearance Interval Design at Signalized Intersections," *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 8, 2011, doi: <https://doi.org/10.11175/eastpro.2011.0.299.0>.
- [48] B. Russo *et al.*, "Impacts of Intersection Treatments and Traffic Characteristics on Bicyclist Safety Final Report SPR 833," 2022.
- [49] M. Hou, K. Mahadevan, S. Somanath, E. Sharlin, and L. Oehlberg, "Autonomous Vehicle-Cyclist Interaction: Peril and Promise," *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376884>.
- [50] M. Barth and K. Boriboonsomsin, "Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 14, no. 6, pp. 400–410, 2009, doi: 10.1016/j.trd.2009.01.004.
- [51] H. Min, X. Xiong, F. Yang, W. Sun, Y. Yu, and P. Wang, "An Energy-Efficient Driving Method for Connected and Automated Vehicles Based on Reinforcement Learning," *Machines*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/machines11020168.
- [52] A. Stevanovic, J. Stevanovic, K. Zhang, and S. Batterman, "Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions: Integrated approach with VISSIM, CMEM, and VISGAOST," *Transp. Res. Rec.*, no. 2128, pp. 105–113, 2009, doi: 10.3141/2128-11.
- [53] S. Alshayeb, A. Stevanovic, J. Stevanovic, and N. Dobrota, "Optimizing of Traffic-Signal Timing Based on the FCIC-PI—A Surrogate Measure for Fuel Consumption," *Future Transportation*, vol. 3, no. 2, pp. 663–683, Jun. 2023, doi: 10.3390/futuretransp3020039.