https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673955223/TESi.2026.18

Od fizičkog ka digitalnom saobraćajnom znaku: Evolucija signalizacije u tranziciji ka autonomnoj mobilnosti[19]

Miroslav Petrović, Elektrotehnički fakultet, Beograd, miroslav.petrovic@itsserbia.rs
Mladen Nedeljkov, Srpsko društvo za inteligentne transportne sisteme, Beograd, mladen.nedeljkov@itsserbia.rs
Ana Trpković, Saobraćajni fakultet, Beograd, a.trpkovic@sf.bg.ac.rs
Dušan Mladenović, Saobraćajni fakultet, Beograd, d.mladenovic@sf.bg.ac.rs
Filip Filipović, Saobraćajni fakultet, Beograd, f.filipovic@sf.bg.ac.rs.

Rezime: Tradicionalna saobraćajna signalizacija zasniva se na vizuelnom prenosu informacija učesnicima u saobraćaju, prvenstveno vozačima, putem standardizovanih znakova i oznaka. Međutim, razvoj kooperativne, povezane i automatizovane mobilnosti (CCAM) i sve veći stepen automatizacije vozila menjaju način na koji se informacije o putnoj infrastrukturi generišu, prenose i koriste. Dok se klasičan saobraćajni znak zasniva na vizuelno kodiranim informacijama koje korisnik – čovek, percipira i interpretira u saobraćajnom procesu, automatizovani sistemi zahtevaju digitalno dostupne, mašinski razumljive, precizne i ažurne podatke integrisane u procese upravljanja vozilom.

Ovaj rad razmatra evoluciju saobraćajne signalizacije od tradicionalnih, fizičkih znakova ka njihovim digitalnim reprezentima u okviru kooperativnih inteligentnih transportnih sistema (C-ITS). Posebna pažnja biće posvećena tranziciji, tokom koje će oba oblika prenosa saobraćajnih informacija morati da koegzistiraju i obezbede dosledno razumevanje saobraćajnog okruženja različitim korisnicima i sistemima upravljanja vozilom. Takva koegzistencija posebno je značajna sa aspekta bezbednosti saobraćaja, jer nedoslednost između fizičkih i digitalnih informacija može uticati na donošenje odluka vozača, naprednih sistema pomoći vozaču i automatizovanih vozila. Ostvarivanje takvog okruženja podrazumeva razvoj odgovarajućih tehnoloških rešenja, zbog čega se u radu analiziraju uloga V2I i V2X komunikacija, HD mapa i virtuelnih saobraćajnih znakova, kao i izazovi interoperabilnosti između putne infrastrukture i vozila.

Pored tehničkih aspekata, rad ukazuje na regulatorne i etičke izazove koji proizlaze iz digitalne transformacije saobraćajne signalizacije, uključujući pitanja pravnog statusa digitalnih informacija, odgovornosti, zaštite podataka, sajber bezbednosti i pouzdanosti digitalne infrastrukture. Posebno je značajno pitanje poverenja u digitalne informacije, jer njihova tačnost, dostupnost i usklađenost sa fizičkom signalizacijom mogu imati neposredan uticaj na bezbedno funkcionisanje saobraćaja. Na osnovu uočenih izazova i identifikovanih istraživačkih pravaca u ovoj oblasti, biće razmotreni mogući pristupi transformaciji saobraćajne signalizacije u uslovima buduće autonomne mobilnosti.

Ključne reči: saobraćajna signalizacija, digitalni saobraćajni znakovi, autonomna vozila, CCAM, C-ITS, V2X, V2I, bezbednost, regulativa, etika

[19] CC-BY licenca

1 UVOD

Saobraćajna signalizacija tradicionalno predstavlja jedan od osnovnih načina komunikacije između putne infrastrukture i učesnika u saobraćaju. Njena uloga zasniva se na prenošenju standardizovanih vizuelnih informacija koje vozač opaža, interpretira i koristi pri donošenju odluka. Razvoj povezanih i automatizovanih vozila menja ovakav koncept, jer korisnik informacije više nije samo čovek, već i sistem vozila koji podatke o saobraćajnoj regulativi mora da primi, prepozna i pravilno interpretira.

Digitalizacija saobraćajne signalizacije zato ne podrazumeva samo pretvaranje fizičkog znaka u njegov digitalni ekvivalent, već promenu načina na koji se saobraćajna informacija definiše, prenosi i koristi. U tranzicionom periodu fizička i digitalna signalizacija moraće da funkcionišu paralelno, uz istovremeno prisustvo konvencionalnih, povezanih i automatizovanih vozila. Time se otvaraju pitanja njihove međusobne usklađenosti, pouzdanosti digitalnih podataka, interoperabilnosti, sajber bezbednosti i odgovornosti.

Cilj rada je da prikaže evoluciju saobraćajne signalizacije od fizičkog ka digitalnom znaku, sagleda zahteve koje automatizovana vozila postavljaju pred saobraćajnu signalizaciju i razmotri moguće pravce tranzicije ka hibridnom sistemu u kojem se ista saobraćajna informacija može preneti različitim komunikacionim kanalima.

2 EVOLUCIJA SAOBRAĆAJNE SIGNALIZACIJE: OD FIZIČKOG KA DIGITALNOM ZNAKU

Saobraćajni znak je tradicionalno fizički element saobraćajne signalizacije koji se nalazi u vertikalnoj ravni u odnosu na saobraćajnicu i čiji oblik, boja, simboli i dimenzije imaju standardizovano značenje. Njegova osnovna funkcija jeste da učesniku u saobraćaju prenese određenu informaciju i omogući mu da na osnovu nje pravovremeno donese odluku. U tradicionalnom konceptu, znak je prvenstveno namenjen čoveku: vozač ga vizuelno uočava, prepoznaje njegov sadržaj i povezuje ga sa odgovarajućim pravilom ili postupkom u saobraćaju, pri čemu se informacija prenosi kombinacijom grafičkih simbola i natpisa, kao i standardizovanim oblikom, veličinom i kodom boja na samom znaku [1].

Od rimskih miljokaza i jednostavnih putokaza, preko znakova upozorenja koje su u XIX veku postavljala biciklistička i automobilska udruženja, do pojave standardizovanih saobraćajnih znakova, oznaka na kolovozu i svetlosnih signala početkom XX veka, njihov razvoj pratio je rast složenosti saobraćajnog sistema i potrebu za sve preciznijim prenošenjem informacija učesnicima u saobraćaju vizuelnim putem.

Razvoj automatizovanih sistema za podršku vozaču i autonomnih vozila postepeno menja ovakvo shvatanje saobraćajnog znaka. Znak više nije samo objekat koji čovek treba da vidi, već postaje informacija koju i sistem u vozilima treba da prepozna i interpretira. Savremena vozila koriste različite senzorske tehnologije za detekciju i interpretaciju saobraćajne signalizacije, čime fizički znak dobija novu ulogu. Njegove karakteristike, kao što su oblik, kontrast, boja, retrorefleksija, vidljivost i stanje površine, postaju značajne i sa aspekta mašinskog prepoznavanja [1, 2]. Istovremeno, razvoj autonomnih vozila otvara pitanje da li postojeći fizički znakovi mogu u potpunosti odgovoriti zahtevima budućih automatizovanih sistema i da li će signalizacija zadržati svoj tradicionalni vizuelni identitet [2].

U narednoj fazi razvoja može se očekivati da fizički znak više ne bude jedini nosilac informacije. Njegov sadržaj može biti predstavljen i u digitalnom obliku, odnosno kao

podatak koji se može preneti neposredno do vozila. Time se menja osnovna karakteristika znaka: informacija više nije nužno vezana za fizički objekat i njegov položaj pored saobraćajnice. U kontekstu ovog rada, pod digitalnim saobraćajnim znakom podrazumeva se digitalna reprezentacija informacije sadržane u saobraćajnom znaku, dostupna sistemu vozila u mašinski čitljivom obliku. Fizički znak može ostati prisutan, ali njegova funkcija može postati dvostruka – predstavlja vizuelnu informaciju za čoveka, dok se istovremeno njegova sadržina može digitalno preneti i interpretirati u sistemu autonomnog vozila [2].

Slika 1: Evolucija saobraćajnog znaka: od fizičkog, preko digitalno podržanog, ka digitalnom znaku

Ovakav prelaz od fizičkog ka digitalnom znaku menja način prenosa saobraćajne informacije. Dok je kod fizičkog znaka informacija sadržana u objektu koji se vizuelno opaža, kod digitalnog znaka ona postaje podatak koji se može elektronski prenositi, obrađivati i ažurirati. Time se otvara mogućnost da informacija o znaku bude dostupna vozilu nezavisno od njegovog neposrednog vizuelnog opažanja [2].

U tranzicionom periodu fizički i digitalni znak neće predstavljati međusobno isključive modele, već će funkcionisati paralelno. Takva koegzistencija predstavlja jednu od ključnih karakteristika prelaska ka saobraćajnoj signalizaciji prilagođenoj povezanoj i automatizovanoj mobilnosti.

3 ZAHTEVI AUTOMATIZOVANIH I AUTONOMNIH VOZILA PREMA SAOBRAĆAJNOJ SIGNALIZACIJI

Zahtevi automatizovanog vozila prema putnoj infrastrukturi i saobraćajnoj signalizaciji neposredno su povezani sa njegovim projektovanim operativnim domenom (Operational Design Domain – ODD), kojim se definišu uslovi u kojima je određeni automatizovani sistem projektovan da funkcioniše. Pored saobraćajnih i vremenskih uslova, ODD obuhvata i karakteristike puta i putne infrastrukture [3]. Sa aspekta saobraćajne signalizacije, to praktično znači da vozilo mora da raspolaže odgovarajućom informacijom o važećem režimu saobraćaja, u obliku i kvalitetu koji sistem može pouzdano da koristi.

U CCAM okruženju vozilo informaciju o saobraćajnoj signalizaciji može da dobije na tri osnovna načina: opažanjem fizičkog znaka pomoću senzora vozila, u digitalnom obliku putem navigacionih i drugih digitalnih mapa i neposrednom komunikacijom sa infrastrukturom (V2I), odnosno, u širem smislu, sa okruženjem (V2X) [3].

Slika 2: Načini dobijanja informacija o saobraćajnoj signalizaciji u CCAM okruženju

Bez obzira na način na koji informacija dolazi do vozila, ona mora biti tačna, pravovremena, pouzdana, standardizovana i mašinski čitljiva. Tačnost podrazumeva da informacija odgovara stvarnom stanju i važećem režimu saobraćaja, dok je kod privremenih izmena, radova na putu ili drugih promena posebno važno vreme potrebno da nova informacija postane dostupna vozilu. Standardizacija i mašinska čitljivost, sa druge strane, treba da obezbede da isto značenje informacije bude prepoznato nezavisno od proizvođača vozila, upravljača puta ili korišćene komunikacione tehnologije .

Očitavanje fizičke signalizacije kamerama i drugim senzorima i dalje predstavlja važan izvor podataka, ali je ograničeno dometom i vidljivošću senzora, stanjem signalizacije, vremenskim uslovima, kao i mogućnošću da znak bude zaklonjen drugim vozilom ili objektom. Zbog toga se u konceptima infrastrukture za automatizovanu vožnju kao jedna od važnih funkcija pametne i povezane infrastrukture navodi upravo mogućnost da vozilu obezbedi informacije koje u datom trenutku nisu dostupne njegovim sopstvenim senzorima.

C-ITS i V2X komunikacije omogućavaju da vozilo deo informacija dobije neposredno od infrastrukture, bez potrebe da prethodno očita fizički znak. C-Roads specifikacije obuhvataju, između ostalog, DENM i IVIM poruke, kao i SPATEM/MAPEM poruke vezane za signalne faze i geometriju raskrsnica. C-Roads koristi i hibridni komunikacioni pristup, kod kojeg se ista C-ITS poruka može prenositi različitim komunikacionim kanalima, uključujući ITS-G5 i mobilne mreže [4].

Digitalne, a posebno HD mape, predstavljaju dodatni izvor podataka za automatizovana vozila. Njihova uloga nije samo u vođenju vozila po izabranoj putanji, već i u obezbeđivanju detaljnijeg opisa puta, saobraćajnih traka i elemenata regulative. U kombinaciji sa preciznim pozicioniranjem, takvi podaci omogućavaju da vozilo raspolaže informacijom o delu puta koji tek dolazi, pre nego što ga senzori neposredno registruju. Zbog toga se u savremenim pristupima fizička infrastruktura, digitalna infrastruktura i komunikacije sve češće posmatraju kao povezani elementi podrške automatizovanoj vožnji.

Navedeni izvori ne treba da se posmatraju kao međusobna zamena. Fizička signalizacija daje neposrednu informaciju o stanju na putu, digitalna mapa omogućava da ta informacija bude dostupna unapred, dok V2X komunikacija omogućava prenos dinamičkih informacija iz infrastrukture. Njihova kombinacija povećava količinu raspoloživih informacija, ali istovremeno otvara i problem njihove međusobne usklađenosti. To je posebno važno kada fizički znak, podatak u digitalnoj mapi i informacija dobijena putem V2X komunikacije ne prikazuju isto stanje.

4 KOEGZISTENCIJA FIZIČKE I DIGITALNE SIGNALIZACIJE

U uslovima paralelnog funkcionisanja fizičke i digitalne signalizacije, osnovni zahtev predstavlja usklađenost informacije u fizičkom i digitalnom prostoru. Promena ograničenja brzine, privremena regulacija u zoni radova ili druga izmena režima saobraćaja mora biti prikazana fizičkom signalizacijom, ali i blagovremeno uneta u digitalne izvore koje koriste vozila. Ako je, na primer, znak na putu promenjen, a podatak u digitalnoj mapi nije, vozač i automatizovani sistem mogu u istom trenutku raspolagati različitim informacijama o istom režimu saobraćaja.

Sa druge strane, povezivanje vozila i infrastrukture pokazuje da digitalni sloj može biti više od prostog digitalnog prikaza fizičkog znaka. Sun i dr. (2018) su u simulacionom okruženju uporedili model vožnje zasnovan na vizuelnom opažanju signalizacije (IDM-VO) sa modelom koji koristi komunikaciju vozila i infrastrukture (IDM-V2I). U analiziranim scenarijima, primena V2I komunikacije smanjila je prosečno vreme putovanja za 12,98%, vreme zadržavanja pri zaustavljanju za 98,32% i potrošnju goriva za 22,53% [5]. Rezultati konkretnog eksperimenta pokazuju potencijal da informacija dobijena od infrastrukture dopuni fizičku signalizaciju i bude iskorišćena pre nego što vozilo dođe u njenu neposrednu blizinu.

Koegzistencija fizičke i digitalne signalizacije zato zahteva drugačiji pogled i na samu promenu režima saobraćaja. Postavljanje, uklanjanje ili zamena fizičkog znaka više nije dovoljno ako ista promena nije sprovedena i u digitalnom sloju. Fizička i digitalna informacija moraju da se menjaju sinhronizovano, a situacije u kojima se razlikuju otvaraju pitanja prioriteta izvora, odgovornosti i bezbednosti sistema.

5 BEZBEDNOSNI, INTEROPERABILNI I REGULATORNI IZAZOVI

Neusaglašenost fizičke i digitalne informacije predstavlja samo jedan od rizika koji nastaju digitalizacijom i povezivanjem saobraćajne signalizacije. Sa aspekta bezbednosti saobraćaja, problem može nastati i kada je informacija neažurna, privremeno nedostupna ili kada različiti izvori – fizička signalizacija, digitalna mapa i V2X poruka – pružaju različite informacije o istom režimu saobraćaja. U takvim situacijama posebno je važno da sistem može da prepozna neusaglašenost i da je razreši prema unapred definisanim pravilima. U potpuno povezanom CCAM okruženju ranjivosti se mogu posmatrati na tri nivoa: u samom vozilu, u komunikacionom sloju kojim se razmenjuju poruke i na aplikativnom, odnosno nadzornom nivou [6]. Za digitalnu signalizaciju posebno je osetljiv komunikacioni sloj, jer neovlašćena izmena ili generisanje lažne V2X poruke može dovesti do toga da vozilo dobije informaciju koja ne odgovara stvarnom režimu saobraćaja. Zbog toga autentifikacija izvora, integritet podataka i zaštita komunikacije postaju deo ukupne bezbednosti saobraćaja. U oblasti vozila ovaj problem je već prepoznat kroz UNECE regulative R155 i R156 i standard ISO/SAE 21434 [6].

Drugi izazov je interoperabilnost. Digitalna informacija mora da zadrži isto značenje bez obzira na sistem kroz koji prolazi i vozilo koje je koristi. C-Roads je ovaj problem rešavao kroz zajedničke tehničke specifikacije i međusobna testiranja, uključujući DENM, IVIM i SPATEM/MAPEM poruke, pri čemu je u okviru testiranja potvrđivana interoperabilnost između različitih implementacija [4]. Ipak, tehnička interoperabilnost ne daje sama po sebi odgovor na pitanje koji podatak treba smatrati važećim kada se fizička signalizacija, digitalna mapa i V2X poruka međusobno razlikuju. Ovo pitanje je posebno

značajno u uslovima privremene regulacije i dinamičkih promena režima saobraćaja, kada tačnost informacije zavisi i od njenog blagovremenog ažuriranja.

Tu se tehnički problem direktno pretvara u regulatorni. Potrebno je definisati status digitalne informacije u odnosu na fizički postavljenu signalizaciju, ali i odgovornost za njeno kreiranje, ažuriranje i distribuciju. U lancu se pojavljuju nadležni organ, upravljač puta, pružalac podataka ili digitalne mape, operator komunikacionog sistema i proizvođač vozila. Ovakav odnos uklapa se u širi koncept podeljene odgovornosti u sistemima automatizovane mobilnosti, u kojima bezbedno funkcionisanje više ne zavisi od jednog učesnika, već od međusobnog delovanja čoveka, vozila, infrastrukture i drugih aktera uključenih u funkcionisanje sistema [11]. Zbog toga će, paralelno sa daljim tehničkim razvojem, biti potrebno jasnije definisati autoritativni izvor podataka i odgovornosti učesnika u celom lancu.

Pored regulatornih pitanja, digitalizacija saobraćajne signalizacije otvara i određena etička pitanja. Ona se pre svega odnose na poverenje korisnika u digitalne informacije i automatizovane sisteme, transparentnost načina na koji se te informacije koriste pri donošenju odluka, kao i na pitanje odgovornosti u slučaju pogrešne ili neažurne informacije. U tranzicionom periodu, neusaglašenost informacije koju vozač opaža na fizičkoj signalizaciji i one koju prikazuje ili koristi sistem vozila može dodatno uticati na poverenje korisnika u automatizovane funkcije. Poseban izazov predstavlja situacija u kojoj odluka automatizovanog sistema zavisi od podataka koji se razmenjuju između većeg broja učesnika, zbog čega granica odgovornosti između upravljača puta, pružaoca podataka i proizvođača vozila može postati manje jasna.

6 MODEL TRANZICIJE KA HIBRIDNOJ SAOBRAĆAJNOJ SIGNALIZACIJI

Prelazak sa tradicionalne na digitalizovanu saobraćajnu signalizaciju ne treba posmatrati kao jednostavnu zamenu fizičkih znakova njihovim digitalnim ekvivalentima, već kao postepen proces prilagođavanja putne infrastrukture potrebama automatizovane mobilnosti. Postojeća fizička signalizacija predstavlja polaznu tačku tog procesa, dok se digitalni sloj postepeno uvodi kako bi infrastrukturne informacije postale dostupne i automatizovanim vozilima. Mihalj et al. (2022) ukazuju na značaj prilagođavanja putne infrastrukture, uključujući digitalizaciju, komunikaciju između vozila i infrastrukture i harmonizaciju saobraćajnih informacija [7].

Jedan od relevantnih okvira za opisivanje takve tranzicije jeste ISAD (Infrastructure Support levels for Automated Driving) klasifikacija koju su predložili Carreras et al. (2018) [9]. Njena vrednost za proces tranzicije nalazi se u tome što infrastrukturu ne posmatra kao sistem koji se odjednom transformiše, već predviđa različite nivoe podrške automatizovanoj vožnji. Erhart et al. (2020) ovaj pristup dodatno razvijaju kroz analizu statičkih i dinamičkih infrastrukturnih informacija i komunikacionih sposobnosti infrastrukture, pokazujući da različiti delovi putne mreže mogu imati različite nivoe spremnosti [9]. Tranzicija se stoga može odvijati postepeno, kako vremenski tako i prostorno.

U početnoj fazi takvog procesa digitalni sloj može predstavljati digitalnu reprezentaciju postojećih saobraćajnih znakova. Time se postojeća informacija ne menja, već se omogućava njen prenos i automatizovanom vozilu. U narednim fazama digitalni sloj može biti proširen dinamičkim informacijama, kao što su privremena ograničenja,

radovi na putu ili promene režima saobraćaja. Daljim razvojem omogućava se neposredna komunikacija između infrastrukture i vozila. Fizička signalizacija pri tome ne nestaje, već nastavlja da funkcioniše paralelno sa digitalnim slojem.

Ovakav postepeni razvoj odgovara širem pravcu razvoja infrastrukture za automatizovanu mobilnost. Dok ISAD pristup omogućava razlikovanje nivoa infrastrukturne podrške, novija istraživanja sve više posmatraju fizičku i digitalnu infrastrukturu kao međusobno povezane komponente šireg sistema. Mantouka et al. (2026) ukazuju na potrebu integracije fizičke infrastrukture, digitalnih tehnologija, vozila i upravljačkih mehanizama kako bi se omogućilo pouzdano širenje automatizovane mobilnosti [10]. Time se digitalizacija saobraćajne signalizacije više ne posmatra kao izolovana tehnološka promena, već kao deo šire transformacije saobraćajnog sistema.

Ovakav pristup vodi ka shvatanju hibridne signalizacije kao sistema u kojem je osnovna jedinica saobraćajna informacija, a fizički i digitalni znak predstavljaju njene različite načine komunikacije. Cilj tranzicije zato nije da jedan kanal zameni drugi, već da se obezbedi da različiti kanali prenose međusobno usklađenu informaciju i da njihova upotreba ne dovede do nepredvidivog ponašanja učesnika u saobraćaju.

Stoga se kao realniji model tranzicije nameće hibridna signalizacija zasnovana na principu **„jedna saobraćajna informacija – više komunikacionih kanala“**. Njena suština nije u tome da fizički znak bude zamenjen digitalnim, niti da jednom od njih bude unapred dodeljen apsolutni prioritet. Suština je u uspostavljanju sistema u kojem je saobraćajna informacija jedinstvena, njeni različiti oblici međusobno usklađeni, a eventualni konflikti prepoznati i rešeni prema unapred definisanim pravilima. Takav model omogućava postepenu digitalizaciju postojeće infrastrukture i istovremeno pruža osnovu za bezbednu koegzistenciju konvencionalnih, povezanih i automatizovanih vozila.

7 ZAKLJUČAK

Razvoj povezane i automatizovane mobilnosti postepeno menja ulogu saobraćajnog znaka. Saobraćajna informacija više nije namenjena isključivo vizuelnom opažanju vozača, već mora biti dostupna i sistemima vozila u digitalnom i mašinski čitljivom obliku. To, međutim, ne znači da će digitalni znak jednostavno zameniti fizički, već da će se način prenosa saobraćajne informacije razvijati ka sistemu u kojem fizička signalizacija, digitalne mape i komunikacija vozila i infrastrukture funkcionišu kao različiti kanali iste informacije.

Ključni izazov takvog sistema biće obezbeđivanje tačnosti, ažurnosti i međusobne usklađenosti informacija, uz jasno definisane zahteve u pogledu interoperabilnosti, sajber bezbednosti i odgovornosti za njihovo kreiranje, ažuriranje i distribuciju. Posebno značajno biće pravovremeno prepoznavanje i razrešavanje situacija u kojima različiti izvori pružaju neusaglašene informacije o važećem režimu saobraćaja, jer takve razlike mogu neposredno uticati na odluke vozača i automatizovanih sistema i time značajno uticati na bezbednost i poverenje korisnika u nova tehnološka rešenja. Tranziciju zato treba posmatrati kao postepen razvoj hibridne signalizacije zasnovane na principu „jedna saobraćajna informacija – više komunikacionih kanala“. Hibridnost nije samo nužno privremeno stanje tranzicije, već može biti racionalan način funkcionisanja infrastrukture tokom dugog perioda koegzistencije različitih tipova vozila.

LITERATURA

[1] Trpković, A., Subotić, I., Reković, P., Vukobratović, I., Mostafa, N. (2018). Standardization, design and use of graphic symbols in traffic engineering. Put i saobraćaj, 64(4), 43–47. DOI: 10.31075/PIS.64.04.06.

[2] Trpković, A., Stanić, B., Jevremović, S. (2022). Budućnost saobraćajne signalizacije u eri pametnih puteva i autonomnih vozila. Zbornik radova XL Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2022, Beograd, 365–374. DOI: 10.37528/FTTE/9788673954165/POSTEL.2022.038.

[3] Petrović, M., Mladenović, D., Nedeljkov, M. (2026). Kategorizacija saobraćajnih znakova u kooperativnoj, povezanoj i automatizovanoj mobilnosti, Zbornik radova 6. srpski kongres o putevima, Beograd, 2026. DOI: 10.31075/6SKP.41

[4] C-Roads Platform. (2023). C-Roads – Working Groups Status, Generation of C-ITS Specifications & Implementation in Austria, Release 2.0.6.

[5] Sun, D., He, Y., Zhao, M., Cheng, S. (2018). Cooperative driving modelling in the vicinity of traffic signals based on intelligent driver model. IET Intelligent Transport Systems, 12(10).

[6] Petrović, M., Mladenović, D., Nedeljkov, M. (2025). Standardi infromacione bezbednosti primenjeni u bezbednosti drumskog saobraćaja, Zbornik radova XLIII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2025, Beograd, DOI: 10.37528/FTTE/9788673955056/POSTEL.2025.30

[7] Mihalj, T., Li, H., Babić, D., Lex, C., Jeudy, M., Zovak, G., Babić, D., Eichberger, A. (2022). Road Infrastructure Challenges Faced by Automated Driving: A Review. Applied Sciences, 12(7), 3477.

[8] Carreras, A., Daura, X., Erhart, J., Rührup, S. (2018). Road Infrastructure Support Levels for Automated Driving. Proceedings of the 25th ITS World Congress, Copenhagen.

[9] Erhart, J., Harrer, M., Rührup, S., Seebacher, S., Wimmer, Y. (2020). Infrastructure Support for Automated Driving: Further Enhancements on the ISAD Classes in Austria. Proceedings of the 8th Transport Research Arena (TRA 2020).

[10] Mantouka, E. G., Vakrinou, K., Christidis, K. N., Magoutas, B., Kiousi, A., Vlahogianni, E. I. (2026). Automated Vehicle Traffic: A Review of Operational Challenges, Infrastructure Requirements and Research Directions. Sensors, 26(4), 1232. DOI: 10.3390/s26041232.

[11] Mladenović, D., Petrović, M., Filipović, F. (2026). Etički aspekti primene autonomnih vozila i njihov uticaj na bezbednost saobraćaja. Zbornik radova 21. Međunarodna konferencija „Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici“, Vrnjačka Banja, Srbija, 22–25. april 2026.

SUMMARY

From Physical to Digital Traffic Signs: Evolution of Traffic Signage in the Transition to Autonomous Mobility

Abstract: Traditional traffic signage is based on the visual communication of information to road users, primarily drivers, through standardised signs and markings. However, the development of Cooperative, Connected and Automated Mobility (CCAM) and increasing levels of vehicle automation are changing the way information about road infrastructure is generated, transmitted and used. While conventional traffic signs rely on visually encoded information perceived and interpreted by the human user within the

driving process, automated systems require digitally available, machine-readable, accurate and up-to-date data integrated into vehicle control processes.

This paper examines the evolution of traffic signage from traditional physical signs towards their digital representations within Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS). Particular attention is given to the transition period, during which both forms of traffic information communication will need to coexist and ensure a consistent understanding of the traffic environment by different users and vehicle control systems. Such coexistence is particularly important from a road safety perspective, as inconsistencies between physical and digital information may affect the decision-making of drivers, advanced driver assistance systems and automated vehicles. Achieving such an environment requires the development of appropriate technological solutions. Accordingly, the paper analyses the role of V2I and V2X communications, HD maps and virtual traffic signs, as well as interoperability challenges between road infrastructure and vehicles.

In addition to technical aspects, the paper addresses regulatory and ethical challenges arising from the digital transformation of traffic signage, including the legal status of digital information, liability, data protection, cybersecurity and the reliability of digital infrastructure. Trust in digital information is particularly important, as its accuracy, availability and consistency with physical signage may have a direct impact on the safe operation of the transport system.

Based on the identified challenges and research directions in this field, the paper considers possible approaches to the transformation of traffic signage in the context of future autonomous mobility..

Key words: traffic signage, digital traffic signs, autonomous vehicles, CCAM, C-ITS, V2X, V2I, road safety, regulation, ethics