

Inteligentni transportni sustavi

Faletar, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:757080>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-05**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

INTELIGENTNI TRANSPORTNI SUSTAVI

Završni rad

Mislav Faletar

Osijek, 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	2
2. OPĆENITO O INTELIGENTNIM TRANSPORTNIM SUSTAVIMA	3
3. INFRASTRUKTURA	6
3.1. Pametne ceste	6
3.2. Pametni prometni znakovi	9
3.3. Pametna ulična rasvjeta	10
3.4. Pametna raskrižja	11
3.5. Ad-Hoc mreže vozila (VANET)	12
4. INFRASTRUKTURA KOMUNIKACIJSKOG SUSTAVA IMPLEMENTIRANA U ITS-U	14
3.1. Mobilna mreža četvrte generacije (4G)	14
3.2. Mobilna mreža pete generacije (5G)	17
3.3. IEEE 802.11p standard	18
3.4. V2X način komunikacije	19
5. AUTONOMNA VOZILA	21
3.1. Razine autonomije	21
6. PREGLED PROGRAMA ZA SIMULACIJU AD-HOC MREŽE VOZILA	23
6.1. Simulation of Urban Mobility (SUMO)	23
6.2. Objective Modular Network Testbed in C++ (OMNeT++)	23
6.3. Vehicles in Network Simulation (VEINS)	24
8. ZAKLJUČAK	29

LITERATURA	30
POPIS SLIKA.....	32
POPIS TABLICA.....	32
SAŽETAK.....	33
ABSTRACT	34
ŽIVOTOPIS.....	35
PRILOZI.....	36

1. UVOD

Ovaj rad je osmišljen kako bi na jednom mjestu ujedinio i pobliže objasnio inteligentni transportni sustav (ITS) za cestovni promet, te njegove elemente. Cijeli ITS sastoji se od više zasebnih elemenata koji su međusobno povezani i čine koherentnu cjelinu. Razvoj elemenata ITS-a ne mora ovisiti o drugim elementima, stoga je potrebno dobro proučiti te elemente kako bi se pravilno izvršilo njihovo integriranje u sustav. Pravilno izvršeno integriranje je važno kako ne bi došlo do miješanja različitih tehnoloških standarda koji mogu uzrokovati posljedice velikih razmjera (npr. velike zastoje, lančane sudare, smrt putnika). Veliku ulogu u razvoju tih elemenata imaju geografsko područje, gdje će biti primijenjeni, stanje postojeće infrastrukture, ekonomska situacija i mnogi drugi.

Budući da je cestovni promet duboko ukorijenjen u ljudsku svakodnevicu, od velike je važnosti da ITS bude jasno definiran i standardiziran kako bi bio što sigurniji za pješake, druga vozila i okolinu (npr. životinje). Također je važno da tehnološki standardi ITS-a prate razvoj novih tehnologija kako bi sigurnost i pouzdanost bili konstantno na vrhuncu. Prilikom integracije inteligentnog sustava u postojeću cestovnu infrastrukturu potrebno je postepeno uvoditi tehnologije od kojih se taj sustav sastoji. Time ljudi dobivaju dovoljno vremena shvatiti da se događaju promjene, te prihvatiti novu tehnologiju kao dio svakodnevice. To vremensko razdoblje prilagodbe pogodno je za testiranje nekih dijelova sustava u različitim uvjetima, te za izvršenje određenih promjena kako bi rad bio optimiziran. Uzmimo za primjer nove prometne kamere na području Republike Hrvatske. Nakon postavljanja kamera na rasvjetne stupove, potrebno je provjeriti jesu li usmjerene pravilno kako bi imale pregled nad točno određenim djelom ceste, postoji li nešto što će omesti optičku vidljivost kamera, kao npr. njihanje grane zbog jakog vjetra koju je zatim potrebno ukloniti ili neka mogućnost sabotiranja od prolaznika i sl.

Krajnji cilj ITS-a je gotovo potpuno automatizirati cestovni promet i prepustiti kontrolu vozila računalu koje je smješteno unutar vozila. Time se uklanja mogućnost nesreće uzrokovane vozačem jer vozač neće biti potreban u takvom sustavu, stvara se protočniji promet, smanjuje vrijeme putovanja. Korisnik će morati izvršiti unos plana puta ili destinacije u vozilo koje će tada izvršiti kalkulaciju određivanja optimalne rute do krajnje destinacije. Upravljanje vozilom neće biti potrebno no svejedno ostaje kao mogućnost ukoliko korisnik to želi, jer svatko treba imati mogućnost slobodne volje i slobode kretanja iako bi to moglo uzrokovati kršenje zakona. Kako bi se ostvarilo potpuno implementiranje inteligentnih transportnih sustava potrebno je još dosta vremena jer se moraju izvršiti

prijeko potrebne simulacije, standardizirala i testirala tehnologija, no najviše zbog promjene mentaliteta ljudi koji su navikli na trenutni svakodnevni promet.

Rad je podijeljen na osam poglavlja. Krenuvši od drugog poglavlja, detaljnije opisuje koncept inteligentnih transportnih sustava kako bi se shvatila opsežnost sustava. Treće poglavlje sadrži opis infrastrukture s fokusom na pametne ceste i cestovni promet. Četvrto poglavlje prikazuje komunikaciju unutar sustava, što je ključni dio sustava, jer je to jedan od dijelova koji ga čine inteligentnim. Peto poglavlje opisuje koncept autonomnih vozila, od čega se oni sastoje i probleme koji se uz njih vežu. Šesto poglavlje predstavlja *ad-hoc* mreže vozila i programe korištene za simulaciju komunikacije između vozila. Sedmo poglavlje prikazuje simulaciju širenja informacija između vozila na području grada Osijeka. Osmo poglavlje sadrži analizu simulacije, te ključne ideje o određenim problema predstavljenim u ovom radu.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog rada je predstaviti inteligentne transportne sustave za cestovni promet kao i funkcije tog sustava, te jednostavnom simulacijom prezentirati način rada nekih dijelova tog sustava. Cijeli sustav je podijeljen u zasebne kategorije, koje su detaljnije objašnjene, kako bi se na kraju mogla stvoriti šira slika o tome što zapravo inteligentni transportni sustavi predstavljaju. Predstavljene kategorije, uz mnoge prednosti, također donose i određene probleme kao što su sigurnost, privatnost, troškovi održavanja određenih tehnologija itd., te su ti problemi i neki načini rješavanja istih obrađeni u daljnjem tekstu

2. OPĆENITO O INTELIGENTNIM TRANSPORTNIM SUSTAVIMA

Prema [1], ITS možemo definirati kao holističku, upravljačku, informacijsku i komunikacijsku nadogradnju na trenutnu prometnu infrastrukturu. ITS nam omogućuje povećanje performansi, bolji tok prometa, efikasniji i sigurniji prijevoz putnika i robe, te se time smanjuje zagađenje zraka i povećava udobnost putovanja. ITS-i su složeni sustavi, građeni od zasebnih elemenata. Ti elementi imaju svoju svrhu koja je ograničena ako se koriste zasebno. No, ako te elemente povežemo u cjelinu, gdje elementi međusobno razmjenjuju informacije, procesiraju ih, te na temelju njih izvršavaju određene radnje, tada je stvoren iznimno moćan i pouzdan sustav na koji se ljudi mogu osloniti. Kao što se može vidjeti na slici 2.1., ITS obuhvaća gotovo sve vrste transporta: cestovni, zračni, željeznički, pomorski, te imaju mogućnost međusobnog komuniciranja, što ovaj sustav čini poprilično opširnim i efikasnim [2]. U daljnjem tekstu bit će predstavljeni pojedini dijelovi ITS-a za cestovni promet.



Slika 2.1. Inteligentni transportni sustavi [2]

Prometne nesreće, gužve u prometu i zagađenja počinju predstavljati sve veći problem zbog povećanih zahtjeva za putovanja. Kako bi ti problemi bili smanjeni, odnosno uklonjeni, ITS je razvijen s mogućnošću integracije različitih sustava koji imaju sposobnost analiziranja i rješavanja tih problema. Neki od tih sustava su razni senzori, komunikacija, diseminacija informacija i kontrola prometa. Prema [3], za pravilno funkcioniranje ITS-a potrebne su tri funkcije: prikupljanje podataka, obrada podataka, te odašiljanje podataka.

Sustav za prikupljanje podataka obuhvaća veoma širok spektar o vrsti podataka koja se prikuplja. Prikupljati se mogu informacije o količini vozila koja su prošla određenim dijelom ceste ili raskrižjem, prosječnom vremenu prolaska vozila određenom dionicom ceste, registracijama vozila, trenutnoj brzini vozila, uporabi sigurnosnog pojasa i mnogim drugim parametrima. Najnoviji način prikupljanja ovih informacija u Republici Hrvatskoj predstavlja prikupljanje informacija cestovnog prometa putem kamera koje su ugrađene na rasvjetne stupove. Kamere trenutno prikupljaju informacije o pravilnoj uporabi sigurnosnog pojasa, trenutnoj brzini vozila, registracijskom broju i uporabi mobilnog telefona tijekom vožnje, a zatim tu informaciju šalju sustavu za obradu podataka.

Sustav za obradu podataka prima podatke od sustava za prikupljanje podataka, obrađuje dobivene podatke, uspoređuje ih sa zadanim kriterijima, naposljetku izvršava određenu akciju na temelju rezultata obrade podataka. Za primjer se može navesti prekoračenje brzine vozila na određenoj dionici ceste. Ukoliko je vozilo prekoračilo ograničenje brzine, sustav koji je obradio te podatke poslat će kaznu na kućnu adresu osobe na koju je vozilo registrirano. Ako je ovaj sustav povezan sa sustavom za odašiljanje podataka, stvorena je mogućnost adaptacije prometa ovisno o trenutnim zahtjevima putovanja.

Sustav za odašiljanje informacija šalje informaciju putem cestovne infrastrukturne jedinice (engl. *Road Side Unit; RSU*), vozila koje trenutno prometuje cestom ili nekog drugog komunikacijskog uređaja (npr. mobilnog telefona). Tu informaciju prima sustav za obradu podataka, inteligentno vozilo ili neki drugi komunikacijski uređaj kako bi se ta informacija obradila ili prosljedila na odredište. Kao primjer je navedeno prometovanje inteligentnog vozila cestom koje ima mogućnost primanja informacija i na temelju tih informacija donosi odluke o brzini vozila, planu puta, itd. Tada jednostavno, putem sustava za odašiljanje informacija, može odaslati informacija o stanju prometa na cesti i prepustiti računalu unutar vozila da korigira parametre kao što su brzina vozila, promijene plana

puta ukoliko je potrebno ići obilaznom cestom i sl. Time je smanjen zastoje na cesti jer se vozač ne mora zapitkivati ide li dobrom obilaznom cestom. Također je smanjen rizik od moguće prometne nesreće zbog toga što će računalo odlučiti što treba učiniti na temelju danih informacija, umjesto vozača koji se uglavnom oslanja na prethodna iskustva u vožnji i logiku.

Trenutno je ITS za cestovni promet u Republici Hrvatskoj tek u začetku, no nedavnim postavljanjem prometnih kamera koje mjere brzinu vozila, provjeravaju registraciju vozila, primjenu sigurnosnog pojasa i korištenje mobilnog telefona prilikom vožnje, može se primijetiti kako tehnologije ITS-a postaju sve većim dijelom svakodnevnog života. Prilikom postavljanja kamera moglo se primijetiti negodovanje lokalnih stanovnika koji su stvorili rutinu vožnje na određenim dionicama ne pridržavajući se pravila ograničenja brzine. Neovisno o navikama stanovnika, ovo je korak naprijed u pogledu implementacije nekih od dijelova ITS sustava, te je samo pitanje vremena kada će se lokalno stanovništvo priviknuti na promjene okoline koje neupitno doprinose sigurnosti na cesti, te smanjuju rizik od prometnih nesreća.

3. INFRASTRUKTURA

Infrastruktura je ključni dio inteligentnih transportnih sustava. Potrebno je stvoriti kvalitetnu i standardiziranu infrastrukturu kako bi bila kompatibilna, odnosno interoperabilna s ostalim komponentama inteligentnih transportnih sustava. Prema [4], problemi koji se javljaju u cestovnom prometu današnjice su prometne nesreće, zastoji u prometu, zagađenje okoliša, cijena i nestašica goriva, te mnogi drugi. Najveći problem cestovnog prometa u gradovima koji imaju porast stanovništva je samim time i sve veći broj sudionika u prometu jer dolazi do većeg zastoja u prometu i povećanja mogućnosti za prometnu nesreću. Upravo zbog toga potrebno je stvoriti infrastrukturu koja će pružati podršku inteligentnim vozilima i ostalim dijelovima sustava kako bi se povećala sigurnost, smanjilo vrijeme putovanja i ostvario bolji tok prometa. Prema [4], podijelivši infrastrukturu na zasebne komponente kao što su pametne ceste, pametna ulična rasvjeta, pametni prometni znakovi kao i inteligentna vozila, omogućen je razvoj i unaprjeđenje pojedinačne komponente neovisno o drugoj. Glavna komponenta, odnosno okosnica cestovnog prometa je sama cesta i potrebno ju je redizajnirati kako bi implementacijom pametnih elemenata postala pametna cesta.

3.1. Pametne ceste

Unazad pedeset godina ceste su bile shvaćene kao čvrsto tlo po kojemu se moglo kretati s određenom sigurnošću. Razvojem tehnologija došlo je do promjene tog viđenja, te je cilj postao osposobiti ceste za izvršavanje puno više funkcija od trenutne, da su samo stabilno čvrsto tlo po kojemu se prometuje i za koje su zakonski određena pravila kretanja. Prema [4], cilj je osposobiti ceste sa sposobnostima određene inteligencije, sakupljanja energije, informacijsko-komunikacijskim mogućnostima, te određenim sposobnostima osjeta. Kada se govori o nadograđivanju prometnica, odnosno izradi pametnih cesta, logično je započeti nadograđivati, unaprijediti samu podlogu po kojoj se prometuje. Poprilično velik dio planeta Zemlje prekriven je cestama po kojoj prometuje jako velik broj vozila koja za svoje kretanje koriste određenu količinu energije. Postavlja se pitanje može li se, i na koji način, to kretanje vozila iskoristiti kako bi se skupila određena količina energije.

Trenutno postoji nekoliko različitih ideja kako skupiti energiju putem cesta. Neke od ideja su korištenje solarnih panela i kolektora, piezoelektričnih elemenata i dr. Koristeći solarne panele, prema [4], sakupljena energija se može iskoristiti za napajanje ulične rasvjete, prometnih znakova i

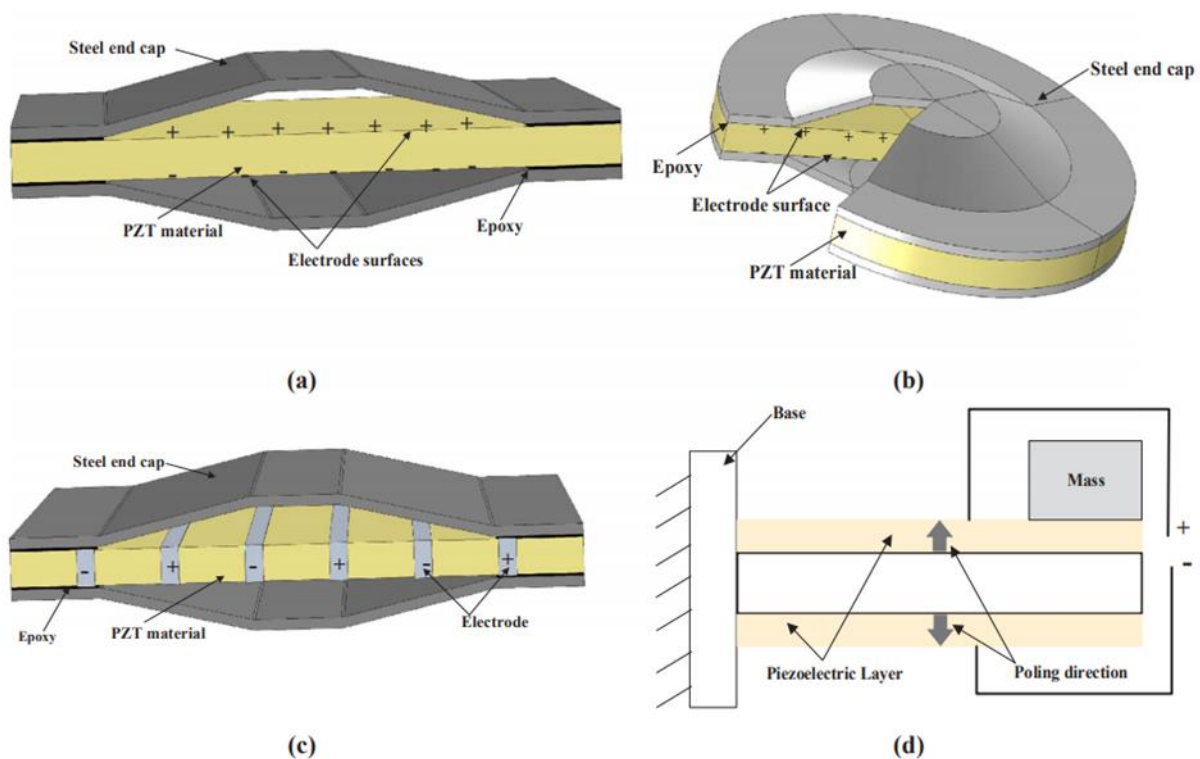
signalizacije, no također se može pohraniti ili priključiti u elektroenergetsku mrežu za daljnje korištenje u domaćinstvima. Takav sustav bi koristio fotonaponske module postavljene na cestu (Slika 3.1.), no prema [5], potrebno je dodatno istražiti iskoristivost fotonaponskih modula zbog otežanog održavanja kao i izdržljivost modula zbog veoma različitih prometnih zahtjeva i vremenskih uvjeta u različitim dijelovima svijeta. Iako je prema [5], fotonaponski sustav najsnažniji po pitanju količine proizvedene energije, predstavljeni novi izazovi poput upravljanja i proklizavanja vozila na modulima, te visoka cijena izrade prototipa, u ovome trenutku nije prikladan za efektivnu primjenu.



Slika 3.1. Cestovni solarni moduli [4]

Prema [5], piezoelektrični materijali stvaraju električni naboj ukoliko je nad njima izvršen mehanički stres. Piezoelektrične uređaje potrebno je ugraditi u ceste s velikim protokom prometa kako bi uređaji funkcionirali u optimalnim uvjetima. Prema [4], uređaji su smješteni 5cm ispod površine asfalta što je dovoljno kako bi mehanički stres utjecao na njihovu deformaciju, te time generirao struju. Uzevši u obzir veliki protok prometa prilikom odabira mjesta primjene ovih uređaja, prema [6], prikupljanje električne energije putem piezoelektričnih uređaja (Slika 3.2.) bi se moglo pokazati financijski

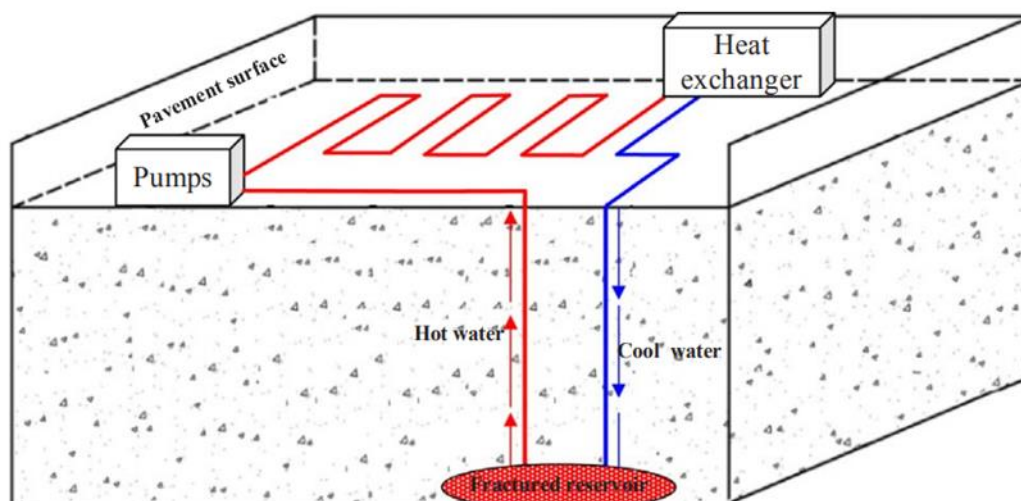
isplativijim od korištenja fotonaponskih panela, te bi time cestovna tehnologija temeljena na vibracijskoj tehnologiji mogla konkurirati izvorima električne energije baziranim na ugljenu, vjetru i nuklearnoj energiji.



Slika 3.2. Pretvarači na osnovi mehaničkog stresa: a) tradicionalni most; b) činela; c) slojeviti most; d) greda na nosaču [5]

Ugradnja tehnologije za prikupljanje energije zahtjeva periodično obnavljanje istih zbog vijeka trajanja, te mogućih kvarova. Zbog ljudskog utjecaja u takvim sustavima, postavlja se pitanje o mogućnosti stvaranja nekog oblika samoodrživih cestovnih tehnologija i sustava. Kao što u kućanstvu postoji primjena geotermalne energije i solarnih kolektora, moguće je tu tehnologiju primijeniti na cestu. Kako bi se mogla primjenjivati tehnologija solarnih kolektora, potrebno ju je adaptirati i ukomponirati u cestu na način da se mreža cijevi, kroz koje cirkulira voda ili određena kombinacija vode i ne-smrzavajuće tekućine, postavi unutar ili ispod asfalta. Kada bi se kombinirale tehnologije solarnih kolektora s tehnologijom prikupljanja geotermalne energije i termoelektričnim generatorom, stvorio bi se sustav koji bi tokom vrućih ljetnih dana prikupljao solarnu energiju koja zagrijava asfalt, te ju pretvorio u električnu energiju putem termoelektričnih generatora. Samim time bi se termalnom kondukcijom snizila toplina asfalta što bi značilo da bi isijavanje topline u okoliš bilo znatno manje.

Također je opcija, energiju prikupljenu solarnim kolektorima, iskoristiti za grijanje domaćinstava ili ju skladištiti. Spajanjem tehnologije za iskorištavanje geotermalne energije, moguće je tu energiju iskoristiti za odmrzavanje poledice stvorene na cesti ili za otapanje snijega [4]. Takav sustav bi uvelike financijski olakšao i vremenski smanjio saniranje snijega na cesti u odnosu na trenutnu metodu.



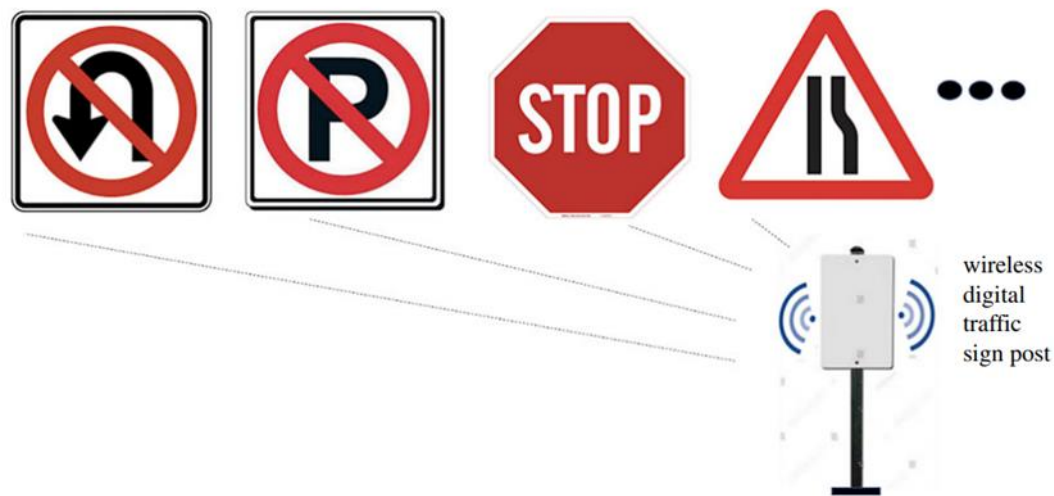
Slika 3.3. Princip rada sustava za iskorištavanje geotermalne energije [5]

Unaprjeđivanje cesta novim tehnologijama dovodi u pitanje zahtjevnost održavanja takvih cesta, cijene popravaka asfalta ukoliko dođe do oštećenja, te zamjene ili servisiranja uređaja ugrađenih u cestu. Od ključne je važnosti da se uz razvoj tehnologija za unaprjeđenje cesta razvija i tehnologija za popravljavanje i održavanje istih kao i edukacija osoba koje će biti zadužene za održavanje i servisiranje.

3.2. Pametni prometni znakovi

Prometni znakovi koji su trenutno u upotrebi su oblikovani komadi metala ili LED paneli na kojima se nalaze oznake koje jasno daju do znanja koji su zakoni primijenjeni na toj dionici ceste. Problemi koji se javljaju kod korištenja takvih znakova su: loše raspoznavanje znakova uslijed nepogodnog vremena (npr. jaki pljusak, tuča, magla i sl.), veliki broj različitih tipova znakova koje vozač treba zapamtiti, nemogućnost postavljanja znaka na optimalno mjesto i sl. Uvođenjem pametnih prometnih znakova, riješio bi se čitav niz problema i potencijalnih opasnosti. Prema [7], ideja je digitalizirati prometni znak na način da se trenutni znakovi zamijene znakom koji će, umjesto površine koja

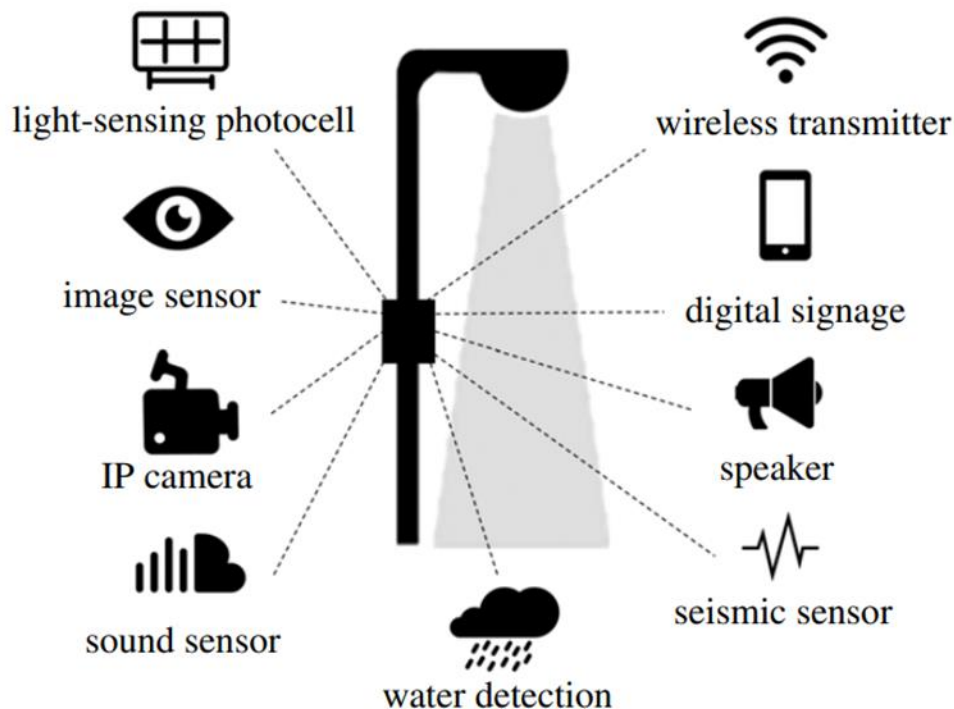
prikazuje pravila prometovanja, ta pravila bežično prenijeti vozilu (Slika 3.4.). Vozilo u tom slučaju interpretira podatke, te ih vizualno ili zvukovno isporučuje vozaču. Time su smanjeni troškovi održavanja, a ukoliko je potrebno nešto promijeniti, to se izvršava ažuriranjem softvera. Smanjena je mogućnost prometnih nesreća jer vozač ne treba konstantno izdvajati dio svoje pozornosti kako bi opazio prometni znak u nepogodnom vremenu. Upravo zbog činjenice da bi cijeli sustav bio baziran na bežičnoj komunikaciji dovodi u pitanje sigurnost u prometu. Potrebno je osmisliti pouzdan sustav koji bi bio otporan na pokušaje hakiranja, ometanja signala, vandalizma i sl.



Slika 3.4. Digitalni programibilni prometni znak [7]

3.3. Pametna ulična rasvjeta

Ulična rasvjeta jedan je od osnovnih dijelova prometnica čiji nedostatak na određenim dionicama može uzrokovati nelagodu prilikom vožnje, te stvoriti nesigurne uvijete za putovanje. Upravo zbog toga je potrebno da razvoj tehnologija ulične rasvjete prati razvoj ostalih komponenti cestovnog prometa. Prema [4], razvoj pametne ulične rasvjete kreće se u smjeru međusobne povezanosti rasvjetnih stupova, korištenja solarnih panela za napajanje rasvjete, postavljanja WiFi bežičnih pristupnih točaka (engl. *Wireless Access Point*), kontrolu intenziteta svjetla ovisno o ambijentu, te prikupljanja podataka o prometu, te prometne analitike. U [4] je predloženo dodavanje različitih senzora (Slika 3.5.) kao što su senzori za praćenje kvalitete zraka, nadzor javne sigurnosti, detekciju ispaljenog metka, detekciju gužve u prometu i sl.



Slika 3.5. Pametna ulična rasvjeta [4]

Najveći napredak bio bi automatsko paljenje rasvjete temeljeno na prolasku automobila i ljudi. Time bi se smanjila potrošnja električne energije, jer prema [8] 30% ukupne električne energije svake države iskorišteno je u svrhu javne rasvjete. Predloženo je korištenje kamera i obrada slike u svrhu paljenja i gašenja rasvjete ukoliko nakon određenog vremenskog intervala cestom nije prošao auto ili čovjek. Kao i kod pametnih prometnih znakova, potrebno je složiti sustav koji bi bilo veoma teško iskoristiti u maliciozne svrhe.

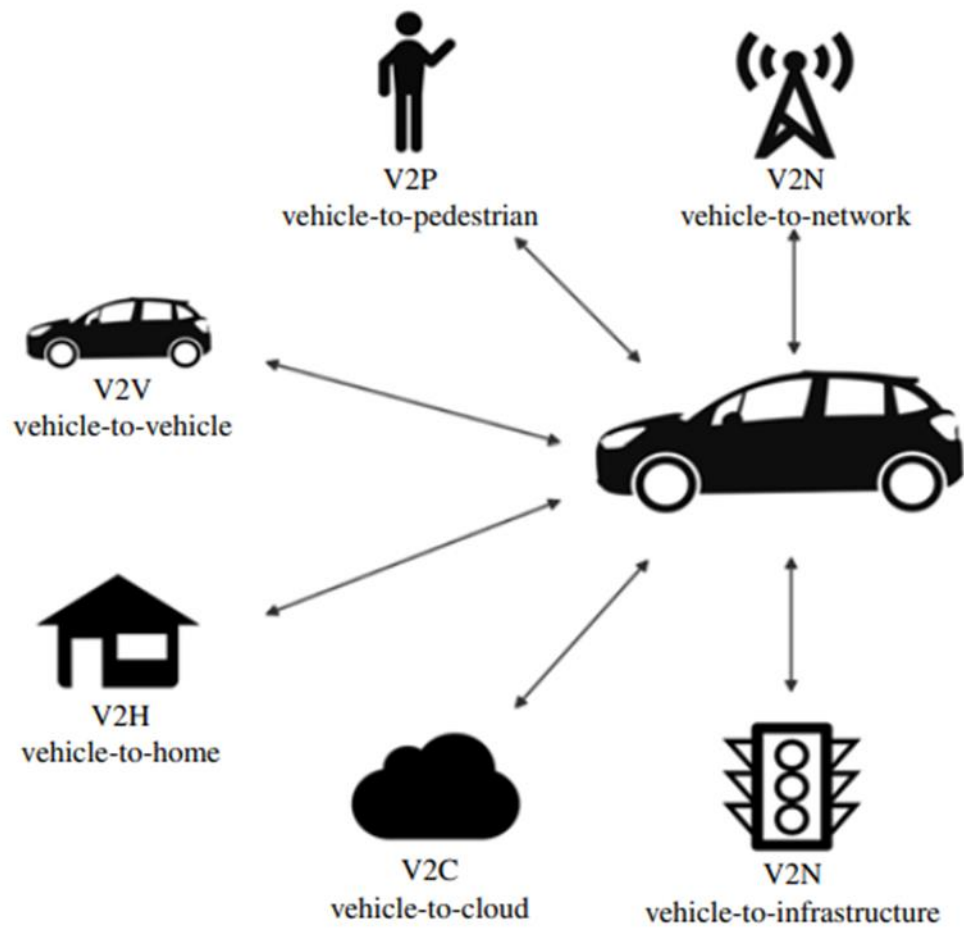
3.4. Pametna raskrižja

Cestovna raskrižja, točke gdje se povezuju dvije ili više cesta, mjesta su na kojima se dogodi najveći broj nesreća. Nesreće se gotovo uvijek dogode zbog ljudske neopreznosti iako se mogu dogoditi i zbog kvara u vozilu. Raskrižja su kao takva, često tema znanstvenika i istraživača koji žele svesti mogućnost događanja nesreće na minimum. Tako je, prema [4], predstavljen sustav pametnog raskrižja gdje su raskrižja opremljena raznim sensorima i opremom za interpretiranje istih kako bi sustav mogao reagirati u stvarnom vremenu i izvršiti određene radnje da se ne bi dogodila prometna nesreća. Neke od tih radnji uključuju: duži rad zelenog svjetla kako bi biciklisti mogli sigurno izaći iz

raskrižja, prioritet puštanja prometa ako se u toj traci nalazi interventno vozilo, prilagodba vremenskog trajanja svjetla na semaforu ovisno o prometu i sl. Sustav pametnog raskrižja, predstavljen od strane Honde, baziran je na ugrađenim kamerama na svakom kutu raskrižja. Koristeći video prikupljen iz kamera, sustav za obradu slike stvara kompletnu sliku raskrižja u vidljivosti od 360°. Prepoznavanje objekata uz umjetnu inteligenciju, klasificira objekte iz te snimke kao pješake, motorna vozila, interventna vozila i dr. Takvim video nadzorom raskrižja uklonjeni su mrtvi kutovi, te je poboljšana pozornost vozača [4]. S druge strane, pametno raskrižje, odnosno pametni semafor, predstavljen u [9], predlaže upotrebu dva upravljača prometa. Sastoji se od glavnog upravljača prometa, koji je implementiran u semafor, čija je svrha vremensko određivanje trajanja prometnih svjetala, te se sastoji od prijenosnog upravljača. Prijenosni upravljač bežično komunicira s glavnim upravljačem prometa, te u hitnim slučajevima daje do znanja glavnom upravljaču kako bi trebao postaviti prednost prolaska u traci gdje je interventno vozilo. Kod takvih sustava se dovodi u pitanje osobna privatnost zbog korištenja kamera, te je li moguće i na koji način zavarati sustav kako bi postavio prednost prolaska osobi krivih namjera.

3.5. *Ad-Hoc* mreže vozila (VANET)

Osposobljavanjem infrastrukture i vozila novim tehnologijama, pojavila se potreba za stvaranjem mobilne *ad-hoc* mreže. Mreža je stvorena u svrhu komunikacije između dva ili više vozila, poznatije kao V2V komunikacija, komunikacije između vozila i infrastrukture koje je znano pod imenom V2I komunikacija, te generalna V2X komunikacija koja označava komunikaciju vozila i nekog drugog objekta kao što je mobilni uređaj, pametna kuća i sl. [4]. Cilj ove tehnologije je smanjiti mogućnost događanja prometne nesreće, no ukoliko se ona dogodi, dati do znanja ostalim vozilima da je došlo do sudara, većeg zastoja ili nekakve druge nesreće, kako bi se vozila koja se kreću u smjeru nesreće kretala drugim rutama i kako ne bi stvorila još veći zastoj ili novu mogućnost za stvaranje prometne nesreće. Prema [4], veliki broj V2V komunikacije osnovan je na 802.11p standardu, dok je ostatak V2X komunikacije osnovan na 3GPP LTE standardu. Prednost takvih sustava je pokrivanje velikog područja djelovanja. Npr. imaju mogućnost slanja poziva u pomoć, ali također imaju mogućnost izvršiti naplatu cestarine. Upravo su zbog toga znanstvenicima zanimljive ove tehnologije jer imaju veliki potencijal, te se mogu koristiti u razne svrhe.



Slika 3.6. V2X komunikacija [4]

4. INFRASTRUKTURA KOMUNIKACIJSKOG SUSTAVA IMPLEMENTIRANA U ITS-U

Komunikacija je razmjena informacija između dvije strane putem prethodno dogovorenog sustava znakova i medija. Odlike ispravne komunikacije su da je pošiljalatelj ispravno formulirao informaciju koju želi poslati, te da je primatelj tu informaciju primio i razumio. Ovaj princip ispravne komunikacije se translata na inteligentne transportne sustave. Za primjer je uzeto slanje određenih informacija od cestovne infrastrukturne jedinice (engl. *Road Side Unit; RSU*) k autonomnom vozilu. Ta informacija mora biti pravilno kodirana i poslana, a od autonomnog vozila se očekuje da tu informaciju dekodira i da procesorska jedinica pravilno obradi informaciju. Kako ne bi došlo do pogrešnog komuniciranja informacije, potrebno je standardizirati kanale kojima je informacija poslana, oblikovanje i kodiranje te informacije, protokole koji su primijenjeni u toj komunikaciji i sl. Stvaranjem potrebe za komunikacijom između više vozila i infrastrukture potrebno je bilo stvoriti tehnologiju koja će omogućiti tu komunikaciju. Tako su stvorene mobilne *ad-hoc* mreže vozila čija je osnova mobilne *ad-hoc* mreže tzv. MANET, no bilo ih je potrebno dodatno modificirati zbog drugačijih uvjeta i slučaja upotrebe. Kako bi vozila ispravno komunicirala potrebno je koristiti različite tehnologije npr. 4G, 5G mobilne mreže, te 802.11p protokol ovisno o vrsti upotrebe.

3.1. Mobilna mreža četvrte generacije (4G)

Mobilnu mrežu četvrte generacije (4G), razvila je organizacija pod nazivom 3GPP (engl. *3rd Generation Partnership Program*). Svrha te organizacije je razvoj i normizacija mobilnih mreža. Prema [10], u pravu četvrtu generaciju mobilnih mreža ubraja se 3GPP revizija 10 što predstavlja napredni LTE (engl. *LTE Advanced*). Također se mogu ubrojiti standardi, pod nazivom *IMT-Advanced Standard* (engl. *International Mobile Telecommunications-Advanced Standard*) predstavljen tržištu kao 4G/4.5G mobilni i internet servis, te *LTE-A Pro* (engl. *LTE Advanced Pro*) što je naziv za 3GPP reviziju 13 i reviziju 14, standarde koji su tržištu predstavljeni kao *4.5G, 4.5G Pro, 4.9G, Pre-5G* i *5G Project*. U Republici Hrvatskoj, dozvolu za korištenje radio-frekvencijskog spektra izdaje Hrvatska regulatorna agencija za mrežne djelatnosti (HAKOM). Prema [11], u tablici 4.1. je prikazan plan dodijele za frekvencijske pojaseve na području Republike Hrvatske, te u koju svrhu se koristi dani frekvencijski pojas.

Tablica 4.1. Plan dodijele za frekvencijske pojaseve preuzet s [11]

Frekvencijski pojas (MHz)	Područje uporabe	Primjena	Raster	Širina kanala	Napomena
880-915/925-960	Republika Hrvatska	GSM	200 kHz	200 kHz	3
		UMTS	200 kHz	Nominalno 5 MHz	1, 3
		LTE	100 kHz	1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz	2, 3
1710-1785/1805-1880	Republika Hrvatska	GSM	200 kHz	200 kHz	3
		UMTS	200 kHz	Nominalno 5 MHz	3
		LTE	100 kHz	1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz	3
1 - nije dopuštena uporaba nosioca frekvencije 882,4 MHz kod uzlazne veze i 927,4 MHz kod silazne veze;					
2 - minimalni razmak između GSM-R i ruba LTE kanala iznosi 200 kHz;					
3 - razmak između rubova GSM, UMTS ili LTE kanala između dva operatora nije obavezan u nekoordiniranom načinu rada					

Tablica 4.2. Prikaz generacije te njezinih svojstava [10]

Oznaka gen. – Naziv	Pristupna radijska mreža	Brzina prijenosa podataka	Spektralna širina
4G LTE napredni	OFDMA (DL)/SCFDMA (UL)	1 Gbit/s (DL) – 500 Mbit/s (UL)	70 MHz (DL) – 40 MHz (UL)

Rad 4G LTE mreža je osnovan na modulacijskoj tehnici pod nazivom kvadraturno amplitudna modulacija (engl. *Quadrature Amplitude Modulation*). U silaznoj vezi primjenjuje se ortogonalno frekvencijski odvojeno multipleksiranje višestrukim pristupom OFDMA (engl. *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*), dok se u uzlaznoj vezi primjenjuje frekvencijska raspodjela višestrukog pristupa na jednom nositelju SC-FDMA (engl. *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) prema tablici 4.2. Kako bi se ostvarila dovoljno visoka kvaliteta i brzina prijenosa informacija potrebno je koristiti sustav baziran na principu „pametnih“ antena pod nazivom *Multi Antenna MIMO* (engl. *Multiple In Multiple Output*) ili *Single user MIMO*. Prethodno navedeni MIMO sustav sastoji se od odašiljačke i prijemne strane, te sadrže M odašiljačkih elemenata i N prijemnih elemenata. Komunikacija se odvija na način da se s odašiljačke strane pošalje podatkovni niz putem M odašiljačkih elemenata, te se na prijemnoj strani s N elemenata primi superpozicija svih poslanih signala. Brzina komunikacije uvelike ovisi o izvedbama M x N MIMO sustava, kao što su 2x2, 4x4 i 8x8 MIMO sustavi. U tablici 4.3. prikazane su vršne brzine prijenosa podataka koje ovise o broju 3GPP revizije, kategoriji, te MIMO sustavu. BS predstavlja baznu stanicu, a MS mobilnu stanicu.

Tablica 4.3. Brzina uzlaznog i silaznog linka ovisno o 3GPP reviziji [10]

3GPP revizija	Kategorija	MIMO	Vršna brzina prijenosa podataka (Mbit/s)	
			BS-MS (DL)	MS-BS (UL)
8	1	1x	19,3	5,2
	2	2x	51	25,5
	3	2x	102	51
	4	2x	150	51
	5	4x	299,6	75,4
10	6	2x ili 4x	301,5	51
	7	2x ili 4x	301,5	102
	8	8x	2998,6	1497,8

3.2. Mobilna mreža pete generacije (5G)

Sve većim zahtjevima potrošača za povećanjem brzine prijenosa podataka, uzrokovanim audio i video prijenosom, te prijenosom podataka putem mobilnih mreža, trenutno korištene 3G i 4G mobilne mreže neće biti u stanju podržati. Upravo zbog tog razloga uvodi se nova tehnologija mobilnih mreža pod nazivom 5G. Prema [12], nadolazeća 5G tehnologija imati će mogućnost dijeljena podataka u bilo kojem trenutku, koristeći širinu pojasa neograničenog pristupa za prijenos informacija s bilo kojeg mjesta putem bilo kojeg uređaja što će biti korisno za pojedinca, poduzeća i društvo. Peta generacija mobilnih mreža (5G) će, uz, bolje povezivanje mobilnih telefona, omogućiti i povezivanje uređaja iz različitih dijelova industrije. Svrha ove tehnologije je nadograditi već postojeću telekomunikacijsku mrežu, te ju proširiti za različite upotrebe što je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1. Prikazuje upotrebu 5G u različite svrhe [13]

Prema [13], brzina 5G će biti do tisuću puta veća od 4G, te će biti veća pouzdanost mreže i efikasnost uređaja. Po kvadratnom kilometru će biti moguće spojiti do milijun uređaja. Očekuje se smanjenje kašnjenja signala, stabilna veza i vrlo brzi Internet. Očekivane performanse, prema [12], koje će pružati 5G tehnologije su:

- 10 – 100 puta više podatkovnog prometa od korisnika

- 10 puta duže trajanje baterije uređaja malih snaga
- 10 – 100 puta veći broj spojenih uređaja
- 1000 puta veću količinu podataka na određenom području (površini)
- 5 puta umanjeno kašnjenje s kraja na kraj (engl. *end to end latency*)

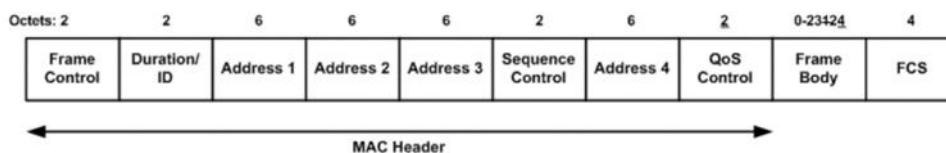
Prema [14], potrebno je odrediti novi dio radiofrekvencijskog spektra zbog toga što je dio spektra manji od 6 GHz poprilično zagušen, te neće moći podržati nove zahtjeve korisnika. Iz tog razloga je porastao interes za korištenje frekvencijskog spektra s milimetarskim valovima. To je dio spektra između 30 i 300 GHz koji ima poprilično veliku slobodnu širinu spektra (engl. *bandwidth*). Frekvencijski rasponi (engl. *frequency bands*) koji ulaze kao kandidati za korištenje 5G su 28 GHz frekvencijski raspon (27.5 – 29.5 GHz), 38 GHz frekvencijski raspon (36 – 40 GHz), 60 GHz frekvencijski raspon (57 – 64 GHz), E-frekvencijski raspon (71 – 76 GHz i 81 – 86 GHz), te naposljetku, W-frekvencijski raspon (92 – 95 GHz).

Primjena 5G tehnologija u ITS-u za cestovni promet ima jako veliku ulogu u velikim, gusto naseljenim gradovima. Upravo zbog frekvencijskog raspona koji 5G tehnologija koristi, mrežna pokrivenost je jako velika, stoga vozila mogu komunicirati međusobno, s infrastrukturom, ili ostalim uređajima velikom brzinom i bez problema u komunikaciji. U manjim gradovima, ukoliko se odluče za implementaciju 5G tehnologije, biti će manja pokrivenost, odnosno 5G usluga će postojati na ograničenom dijelu grada, te prilikom izlaska iz grada brzina prijenosa podataka će biti znatno manja. Zbog korištenja milimetarskih valova u 5G tehnologiji, potrebno je koristiti veliki broj odašiljača kako bi se ostvarila dovoljno dobra pokrivenost. Ukoliko radio-optička vidljivost nije dovoljno dobra, doći će do smanjenja snage signala zbog prepreka što može dovesti do gubitka ili kašnjenja ključnih dijelova neke informacije što može dovesti do značajnih problema.

3.3. IEEE 802.11p standard

Jedan od načina komunikacije vozila s raznim dijelovima infrastrukture i drugim vozilima odvija se koristeći 802.11p protokol. To je nadogradnja na postojeći 802.11 standard razvijen od strane IEEE u svrhu lokalnog bežičnog povezivanja koji je poznatiji kao WiFi. Svrha 802.11p-a je bežično spajanje u okruženju vozila zvano WAVE, te spada pod DSRC (engl. *Dedicated Short-Range Communication*) frekvencijski spektar rada, u Europi poznatiji kao ETSI ITS-G5 protokol. Prema [16], 802.11p protokol standardizira fizički sloj i MAC (engl. *Medium Access Control*) protokol koji se nalazi u

sloju podatkovnog linka OSI modela. S druge strane WAVE protokol definira format poruke, upravljanje, sigurnost i alokaciju kanala za određene vrste primjene. Razlika između 802.11p od ostalih 802.11 protokola je u tome što je 802.11p protokol modificiran na način kao bi se smanjilo vrijeme autentikacije jer je prioritet u što kraćem vremenskom periodu ostvariti vezu između više vozila ili infrastrukture. Zbog toga je, prema [15], uveden tzv. WAVE mode u kojemu WAVE stanica ima dozvolu slati i primiti podatkovne okvire sa tzv. *wildcard* BSSID (engl. *Basic Service Set Identification*) vrijednosti, te prethodno ne mora pripadati niti jednoj BSS grupi. To omogućuje gotovo trenutačnu komunikaciju što je za komunikaciju između vozila u prometu iznimno potrebno iz sigurnosnih razloga. Širina spektra, potrebna za rad ovog protokola, podijeljena je u sedam kanala širine 10 MHz od kojih su dva kanala izdvojena isključivo u svrhu sigurnosti, dok je način rada osnovan na 802.11a standardu, te koristi OFDM modulaciju [16].



Slika 4.2. Format podatkovnog okvira 802.11 standarda [15]

3.4. V2X način komunikacije

Ključan dio evolucije u konstruiranju inteligentnih transportnih sustava je upravo *vehicle-to-everything* (V2X) komunikacija. V2X omogućuje vozilu komunikaciju s direktnim okruženjem, drugim vozilima, pješacima, opremom uz cestu, te internetom. Upravo korištenjem V2X ključne informacije mogu u realnom vremenu biti izmijenjene među vozilima koja sudjeluju u prometu, te na taj način poboljšati svjesnost o situacijama na cestama i tako potencijalno izbjeći prometne nesreće. Svim sudionicima omogućuje pristup informacijama učitanim u tzv. *oblak*, kao što su realna izvješća o trenutnom stanju na cestama, podacima učitanih od strane senzora, te podacima mapiranja visoke razlučivosti. Navedeno nije korisno samo za poboljšanje trenutnog vozačkog iskustva, štoviše biti će presudno za navigiranje potpuno autonomnih vozila budućnosti. Tehnološki standardi korišteni u omogućavanju komunikacije su 3GPP *Release* 14 što je dovelo do stvaranja *cellular* V2X (C-V2X). Nadolazeći standardi 3GPP *Release* 15 i *Release* 16 su nadogradili C-V2X stvaranjem *LTE-based* V2X, te *NR-based* V2X standarda. Prema [17, str. 790], V2X komunikacija definirana od strane 3GPP sastoji se od 4 principa komunikacije: komunikacija vozilo – vozilo (V2V), vozilo – infrastruktura

(V2I), vozilo – mreža (V2N) te vozilo – pješak (V2P). Implicira se da je bežična komunikacija dvosmjerna, odnosno da V2I i V2N dopuštaju infrastrukturi da komunicira s vozilima. V2V i V2P prijenosi temelje se na mogućnosti emitiranja između vozila ili između vozila i ranjivih sudionika prometa. V2I je prijenos između vozila i cestovnih infrastrukturnih jedinica (engl. *Road Side Unit; RSU*). V2N prijenos odvija se između vozila i V2X aplikacijskog servera koji je u *oblaku*. RSU također može biti korišten za proširenje dometa V2X informacije primljene iz vozila djelujući kao čvor za prosljeđivanje. Korištenje RSU kao mrežnih čvorova dio je *LTE-based V2X* komunikacijskih sustava, te se mogu locirati eNB-ovima ili mogu samostalno raditi. Komunikacija V2I omogućuje RSU nadzor nad prometnom situacijom i time pruža mogućnost kontrole prometnih uvjeta poput prometne signalizacije. Daljnji razvoj V2X tehnologije temeljene na LTE-u (engl. *Long Term Evolution*) koristi NR (engl. *New Radio*) značajke, čime se pruža mogućnost sveprisutne pokrivenosti implementacijom 5G. NR V2X za sada nema namjeru zamijeniti usluge koje pruža LTE V2X, osnovna namjera koegzistencije obje tehnologije je razvoj naprednijeg V2X komunikacijskog sustava. V2X značajka početno je predstavljena IEEE 802.11p standardom i podržavala je relativno ograničen broj osnovnih usluga. Kasnije je pokrenut novi projekt nazvan IEEE 802.11bd s ciljem poboljšanja prijašnje verzije i razvijanja značajke slične NR V2X, no i dalje zadržavajući kompatibilnost s IEEE 802.11p. Prema [17, str. 800], analize pokazuju kako je potrebno otprilike 20-30 MHz širine pojasa u uobičajenim scenarijima autocesta za ostvarivanje dometa 300-320 m na temelju LTE V2X komunikacije. U tijeku su pregovori o prilagodbama ITS spektra u niskom i visokom opsegu kako bi se dodijelio novi spektar za V2X. Kao nisko-pojasni opseg navodi se potencijalna upotreba 5.925-6.425 GHz uz trenutnu 5.855-5.925 GHz. Kao visoko-pojasni opseg navodi se dodjela frekvencija iznad 6 GHz u Europi koja može biti ažurirana, te se središnja frekvencija može pomaknuti na frekvencijski pojas od 64.80 GHz i proširiti na 2.16 GHz širine spektra.

5. AUTONOMNA VOZILA

Prema [18], autonomna vozila su inteligentna vozila s dodatnim funkcionalnostima kojima se prikupljaju i obrađuju podaci iz okoline, te automatskim vođenjem vozila, djelomičnom kontrolom vozila i podrškom vozaču. Podaci koje autonomna vozila primaju su podaci senzora raspoređenih po vozilu, podaci primljeni od drugih inteligentnih vozila, cestovnih infrastrukturnih jedinica (engl. *Road Side Unit; RSU*), te pametne infrastrukture (npr. pametne ceste). Rezultat obrade prikupljenih podataka omogućuje bolju detekcija sudara, dinamičnu promjenu rute ukoliko je došlo do nesreće, neprimjetno uključivanje u promet (npr. u raskrižju, bez potrebe stajanja). Primjenom inteligentnih vozila u prometu povećava se udobnost, sigurnost vozača i okoline, te se smanjuje vrijeme putovanja.

Autonomna vozila imaju procesorsku jedinicu smještenu unutar vozila koja ima djelomičnu ili potpunu kontrolu nad vozilom, te daje podršku i upozorava vozača. „Upozoravanje vozača (engl. *collision warning systems*) uključuje funkcije kao što su upozoravanje na opasnost čelnog sudara, izlijetanja s ceste, opasnosti pri prestrojavanju vozila, detekcije pješaka, upozoravanje vozača teških teretnih vozila, itd.“¹ Prema [19], djelomična i potpuna kontrola nad vozilom određene su razinama autonomije vozila. Prema [20], *Society of automotive engineers* (SAE) je klasificiralo razine autonomije cestovnih motornih vozila.

3.1. Razine autonomije

Razine autonomije raspoređene su u šest kategorija: razina 0 (ne-autonomna razina), razina 1 (autonomija specifičnih funkcija), razina 2 (autonomija kombiniranih funkcija), razina 3 (razina ograničene autonomije), razina 4 (vozilo visoke autonomije) i razina 5 (potpuno autonomno vozilo). Razina 0, vozač ima potpunu kontrolu nad vozilom, što znači da je samo on u mogućnosti upravljati primarnim upravljačkim jedinicama vozila (kvačilom, kočnicom, gasom, upravljačem). Razina 1, vozač ima podršku ili asistenciju kod jedne ili više upravljačkih funkcija, kao npr. sustav protiv proklizavanja, elektronski pomoćni sustav kočenja itd. Razina 2, kombinacija barem dviju primarnih funkcija vozila (npr. tempomat i sustav praćenja bijele kolničke linije), koje surađuju s ciljem rasterećenja vozača od kontrole nad tim funkcijama. Razina 3 vozilu je dana sposobnost preuzimanja potpune kontrole u određenim kritičnim situacijama, kada se od vozača očekuje da prepusti potpunu kontrolu autonomnom vozilu, no vozač je u mogućnosti intervenirati ukoliko je to potrebno. Razina

¹ [18, str. 148]

4, vozilo je gotovo potpuno autonomno, što znači da ima kontrolu nad svim funkcijama, pri čemu se od vozača zahtijeva jedino unos destinacije ili plana puta, te se od vozača ne očekuje da u bilo kojem trenutku preuzme kontrolu nad vozilom. Razina 5, potpuno autonomno vozilo sposobno za vožnju u bilo kakvim vremenskim uvjetima bez potrebe za ljudskom interakcijom

6. PREGLED PROGRAMA ZA SIMULACIJU AD-HOC MREŽE VOZILA

Ad-hoc mreže su mreže tipa *peer-to-peer* u kojima se podaci razmjenjuju direktno između dva računala bez posrednika. Prema [2], *ad-hoc* mreže su se razvile u posljednjih deset godina, te su od velikog interesa automobilske industriji. „*Ad-hoc* mreže vozila imaju vrlo dinamičnu i neuravnoteženu mrežnu topologiju zbog toga što se čvorovi (vozila) konstantno i brzo kreću. Komunikacija je podložna stalnim prekidima i kašnjenjima jer često dolazi do prekida mreže i dijeljenja na manje cjeline.“²

6.1. *Simulation of Urban Mobility* (SUMO)

Prema [21], *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) je simulator cestovnog prometa otvorenog koda, smišljen da može podržati velike mreže cesta. Svrha simulatora je simulirati ponašanje vozila u određenim scenarijima, tj. prometnim zahtjevima, kroz danu cestovnu mrežu. Svakom vozilu moguće je dodijeliti zasebne parametre, čime možemo simulirati različita ponašanja ljudi, te time uvesti određeno stohastičko ponašanje. Prema početnim postavkama, simulacije su determinističke, što znači da je potrebno odrediti parametre kako bi simulacija bila ispravna, no moguće je uvesti nasumično, stohastičko, ponašanje kroz određene opcije. Neke od značajki ovog programa su grafičko sučelje, različite vrste vozila, promjena cestovnih traka kod više tračnih cesta, mogućnost odabira prava prolaska vozila i pravila semafora, mikroskopske rute kod kojih svako vozilo ima zasebnu, prethodno određenu, rutu upravljanja mrežom s preko 10 000 ulica itd. Jedna od značajki koja je izrazito bitna je uvođenje mreže ulica nekog grada sa stranice kao što je openstreetmap.org, te je time moguće stvoriti bilo kakav prometni scenarij na željenom području.

6.2. *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++)

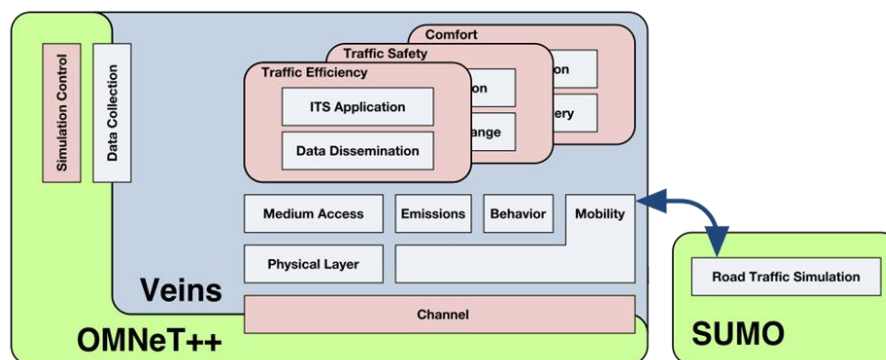
Prema [22], *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++) je objektno orijentirana modularna okosnica (engl. *framework*) za simulaciju mreže bazirana na diskretnim događajima. OMNeT++ nije konkretan simulator, već pruža infrastrukturu i alate za pisanje, odnosno izradu simulacija. Jedan od ključnih dijelova ove infrastrukture je arhitektura komponenti (engl. *component architecture*) za simulacijske modele. Modeli su građeni od modula, a ti moduli mogu biti kombinirani i nadograđeni jedni na druge.

² [2, str. 2]

Moduli mogu komunicirati s drugim modulima putem vrata (engl. *gate*), sadržavati parametre kojima određujemo njihovo ponašanje, slati poruke kroz prethodno definirane kanale ili izravno na odredište što se koristi za simuliranje bežičnih komunikacija. Aktivni moduli se nazivaju jednostavnim modulima (engl. *simple modules*) i mogu se grupirati u složene module (engl. *compound modules*), čime se povećava hijerarhijska razina. Podržava mrežne i pokretne modele kroz nezavisno napravljene *Mobility Framework* i *INET Framework* module. Također podržava ugradnju simulacije u stvarnom vremenu (engl. *real-time simulation*), emulaciju mreže, integraciju baze podataka i mnoge druge kroz nadogradnje (engl. *extention*)[22].

6.3. Vehicles in Network Simulation (VEINS)

Vehicles in Network Simulation (VEINS) je okosnica (engl. *framework*) otvorenog koda, namijenjena za simulaciju mreža vozila u suradnji s mrežnim simulatorom (OMNeT++) i simulatorom cestovnog prometa (SUMO) (Slika 6.1.). Prema [22], služi kao posrednik između ta dva simulatora na način da omogućuje SUMO simulatoru komunikaciju sa OMNeT++ simulatorom putem TCP veze. Koristeći ugrađene module, sinkronizira simulacije, osigurava pravilno izvršavanje i prikupljanje rezultata tih simulacija. Pravilno izvršavanje simulacije, prema [23], izvodi se na način da se simulacija prometa na cesti (SUMO) i mrežna simulacija (OMNeT++) odvijaju paralelno koristeći standardiziran *Traffic Control Interface* (TraCI) protokol. Pomak vozila u simulatoru prometa na cesti odražava pomak čvorišta u simulaciji mreže. Čvorišta imaju mogućnost interakcije sa simulacijom prometa, te se time može simulirati utjecaj inteligentnih vozila u prometu.



Slika 6.1. Veins arhitektura [23]

7. VEINS SIMULACIJA NA PODRUČJU GRADA OSIJEKA

Za izvršavanje simulacije korišteni su prethodno navedeni simulatori. Odabrane su verzije OMNet++ 5.4.1, Veins 5.0 i Sumo 0.30.0 zbog stabilnosti i kompatibilnosti. Karta Osijeka preuzeta je s *Openstreetmaps* stranice s nastavkom *.osm, te je pomoću alata dobivenih uz program Sumo pretvorena u datoteke potrebne za izvršavanje simulacije. Datoteke potrebne za simulaciju imaju nastavke *.net.xml, *.trips.xml, *.rou.xml, te su stvorene pomoću alata randomTrips.py, netconvert.exe, polyconvert.exe i duarouter.exe. Također je bilo potrebno stvoriti *.launchd.xml (Slika 7.1.) i *.sumo.cfg (Slika 7.2.) datoteke koje su potrebne za ispravan rad simulacije. Prvo je pokrenut ../omnetpp-5.4.1/mingwenv.cmd, putem njega otvoren je OMNeT++ naredbom omnetpp, te su istovremeno pokrenuti sumo-launchd.py i sumo-gui.exe naredbom: ../veins-5.0/sumo-launchd.py -vv -c ../sumo-1.2.0/bin/sumo.exe. Kreirane *.xml i *.cfg datoteke premještene su u ../veins-veins-5.0/examples/veins mapu zbog već postojećih elemenata koje je bilo potrebno modificirati prema slici 7.3. i slici 7.4. kako bi se simulacija odvijala bez grešaka.

```
34 <!-- debug config -->
35 <launch>
36   <copy file="osijek.net.xml" />
37   <copy file="100osijek.rou.xml" />
38   <copy file="osijek.poly.xml" />
39   <copy file="osijek.sumo.cfg" type="config" />
40 </launch>
41
42
```

Slika 7.1. Sadržaj osijek.launchd.xml datoteke

```

34 <configuration xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
35 xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/sumoConfiguration.xsd">
36
37   <input>
38     <net-file value="osijek.net.xml"/>
39     <route-files value="100osijek.rou.xml"/>
40     <additional-files value="osijek.poly.xml"/>
41   </input>
42
43   <time>
44     <begin value="0"/>
45     <end value="1000"/>
46     <step-length value="0.1"/>
47   </time>
48
49   <report>
50     <xml-validation value="never"/>
51     <xml-validation.net value="never"/>
52     <no-step-log value="true"/>
53   </report>
54
55   <gui_only>
56     <start value="true"/>
57   </gui_only>
58
59 </configuration>

```

Slika 7.2. Sadržaj osijek.sumo.cfg datoteke

```

#####
#           Simulation parameters           #
#####
debug-on-errors = true
print-undisposed = true

sim-time-limit = 200s

**.scalar-recording = true
**.vector-recording = true

*.playgroundSizeX = 6000m
*.playgroundSizeY = 4000m
*.playgroundSizeZ = 50m

```

Slika 7.3. Izmjenjeni parametri veličine na 6000m, 4000m i 50m

```

#####
#           TraCIScenarioManager parameters   #
#####
*.manager.updateInterval = 1s
*.manager.host = "localhost"
*.manager.port = 9999
*.manager.autoShutdown = true
*.manager.launchConfig = xmldoc("osijek.launchd.xml")

```

Slika 7.4. Izmjenjen parametar *xmldoc* u osijek.launchd.xml

Simulacija se pokreće na način da se u prethodno otvorenom OMNeT++ razvojnom okruženju pozicionira u mapu `../veins-veins-5.0/examples/veins`, te desnim klikom na datoteku `omnetpp.ini` odabere opcija *Run As OMNeT++ Simulation*. Novi prozor je otvoren s prikazom komunikacijske mreže. Pritiskom na tipku *Run* pokreće se simulacija, otvara se novi prozor s grafičkim sučeljem programa Sumo, te se komunikacija između programa Sumo i OMNeT++ odvija u pozadini putem programa Veins.

U novootvorenom prozoru programa OMNeT++ prikazane su zgrade na području grada Osijeka u obliku jednostavnih poligona, te se kroz prethodno definirane parametre stvara određen broj vozila. Vozila putuju prometnicama i u određenim intervalima generiraju i odašilju poruke ostalim vozilima. Kako bi vozila bila uočljivija, postavljeno je da se oko njih stvori ili žuti ili plavi krug ovisno o tome šalju li ili primaju poruke. Kako bi to bilo omogućeno, izmjenjen je kod u datoteci `../veins-veins-5.0/src/veins/modules/application/traci/TraCIDemo11p.cc` prema slikama 7.5. i 7.6.

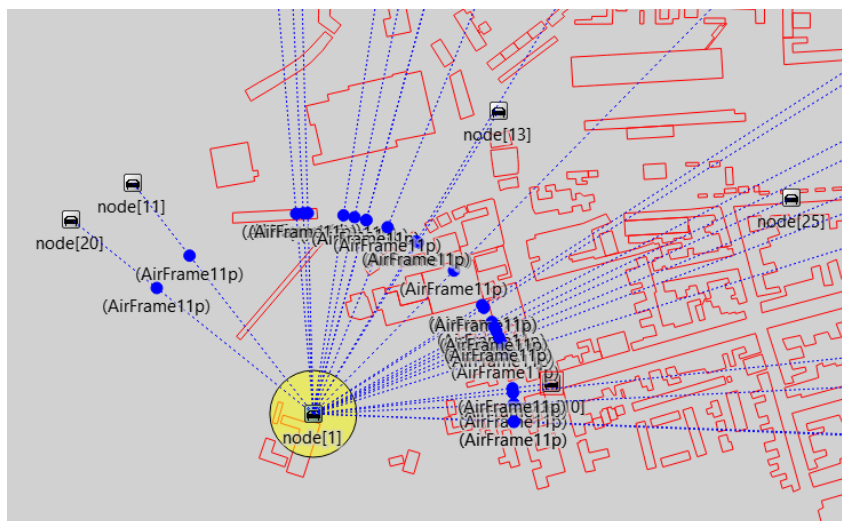
```
void TraCIDemo11p::onWSM(BaseFrame1609_4* frame)
{
    TraCIDemo11pMessage* wsm = check_and_cast<TraCIDemo11pMessage*>(frame);

    findHost()->getDisplayString().updateWith("r=50,blue");
    //...
```

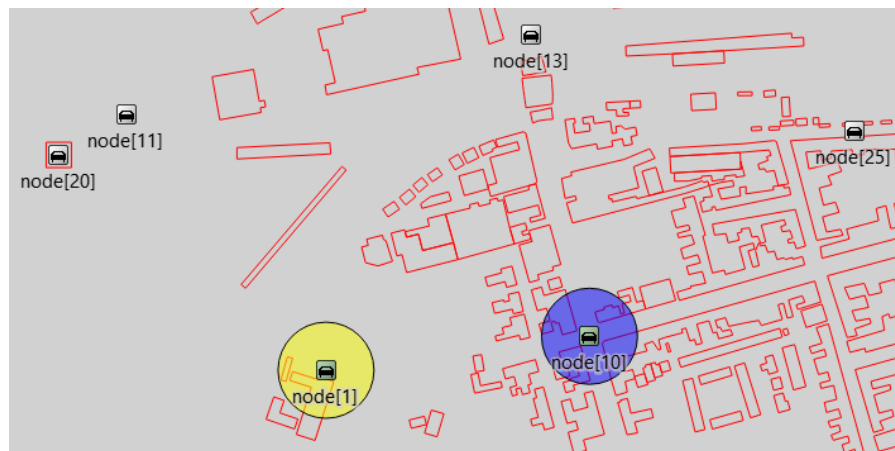
Slika 7.5. Kod za stvaranje plavog kruga

```
void TraCIDemo11p::handleSelfMsg(cMessage* msg)
{
    findHost()->getDisplayString().updateWith("r=50,yellow");
    //...
```

Slika 7.6. Kod za stvaranje žutog kruga



Slika 7.7. Prikaz vozila koje odašilje poruku



Slika 7.8. Prikaz vozila koje je primilo poruku

Prema slici 7.7. žutom bojom naznačeno je vozilo koje šalje poruku, dok je prema slici 7.8. plavom bojom naznačeno vozilo koje je zadovoljilo određene parametre kao npr. jačina signala, poruka primljena bez grešaka, radiooptička vidljivost i sl., te ispravno primilo poruku. Daljnjim odvijanjem simulacije, prikazanom redom u priložima (od P.7.1. do P.7.6), jasno se može primijetiti vozilo koje šalje poruku, te vozilo koje je primilo tu poruku. Simulacija je pokazala da udaljenost između vozila, radiooptička vidljivost i jačina signala imaju najveći utjecaj za ispravno slanje, odnosno primanje poruka.

8. ZAKLJUČAK

Razvoj inteligentnih transportnih sustava posljednjih je godina doživio značajan procvat. Tehnologije više različitih elemenata ITS-a dosegnule su točku gdje se mogu primijeniti u cestovnom prometu. Obnovljivi izvori energije, poput solarnih panela i kolektora, pronašli su primjenu u cestovnom prometu u svrhe odleđivanja cesta u zimskim uvjetima, smanjivanja okolne temperature, te stvaranja električne energije. Zbog zanimanja opće populacije za tu vrstu tehnologije, postala je znatno ekonomičnija nego što je bila prijašnjih godina. Ostatak cestovne infrastrukture orijentiran je prema efikasnosti, no i prema sigurnosti, te se počinje zahtijevati korištenje LED rasvjete na rasvjetnim stupovima, raznih senzora na raskrižjima, te pametnih prometnih znakova koji će biti u komunikaciji s vozilima i ostatkom infrastrukture kako bi se važne informacije na vrijeme predstavile vozaču, te time smanjila mogućnost prometne nesreće. Informacije koje bi ti sustavi slali vozilu potrebno je prenijeti, te ih i obraditi. Razvojem mobilnih komunikacijskih tehnologija stvorena je peta generacija (5G) mobilnih mreža, te je za komunikaciju vozila s infrastrukturom predloženo korištenje 4G i 5G mobilnih tehnologija kao i 802.11p WAVE standard. Svaka od tih tehnologija ima točno određene načine korištenja i odabir tehnologije u danom načinu ovisit će o važnosti poruke, odnosno koliko brzo informacija mora doći do odredišta. Kada bi cestom prometovalo potpuno autonomno vozilo, te zaprimilo informaciju, izvršilo bi točno određene radnje kako bi sigurnost putnika ostala maksimalna, no kako bi i dalje putnici stigli na odredište na vrijeme. Vozilo bi, dakle, trebalo biti opremljeno iznimno snažnim računalom koje bi imalo sposobnost razlučivanja koji su najbitniji dijelovi dobivene informacije, te prema tome donijeti odluku o promijeni rute putovanja. Za vršenje tih radnji vozilo će biti opremljeno računalom s umjetnom inteligencijom koje će te radnje moći izvršiti u veoma kratkom vremenskom roku. Cilj je opremiti vozila s računalnim sustavima koji će preuzeti određene ili sve upravljačke funkcije vozila, te time smanjiti vrijeme putovanja i povećati sigurnost. Proizvođači automobila počeli su na tržište stavljati električna i hibridna vozila koja imaju neke mogućnosti autonomije, te bi se veoma brzo mogla doseći potpuna autonomija vozila. Za stvaranje autonomnog vozila potrebno je izvršiti mnoga testiranja prije samog stvaranja takvog vozila. Računalna simulacija svih komponenata vozila u različitim uvjetima nužna je kako bi se utvrdilo je li takav pristup ekonomski isplativ za primjenu u stvarnom svijetu. Simulacija izvršena u ovom radu pokazuje kako udaljenost između vozila, te prepreke na putu imaju velik utjecaj u odabiru tehnologija za komunikaciju između vozila i infrastrukture. Primjena navedenih tehnologija u cestovnom prometu postat će dio današnjice, smanjit će vrijeme putovanja, povećati standard udobnosti putovanja i uvelike povećati sigurnost sudionika u prometu.

LITERATURA

- [1] S. Mandžuka, „Intelligent transport system: Selected Lectures“ , Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
- [2] J. Balen, „Učinkovito rasprostiranje poruka u mrežama vozila zasnovano na njihovom položaju“, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2014.
- [3] A. Sumalee, H. W. Ho, „Smarter and more connected: Future intelligent transportation system“, IATSS Research, Vol. 42, No. 2, str. od 67 do 71, srpanj 2018.
- [4] C. K. Toh, J. A. Sanguesa, J.C. Cano, F.J. Martinez, „Advances in smart roads for future smart cities“, Proceedings of the Royal Society A, No. 2233, Vol. 476, siječanj 2020.
- [5] H. Wang, A. Jasim, X. Chen, „Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications - A comprehensive review“, Applied energy, Vol. 212, str. od 1083 do 1094, veljača 2018.
- [6] S. Kim, J. Shen, M. Ahad, „Piezoelectric-based energy harvesting technology for roadway sustainability“, International Journal of Applied Science and Technology, No. 1, Vol. 5, str. od 20 do 25, veljača 2015.
- [7] C.K. Toh, J.C. Cano, C. Fernandez-Laguia, P. Manzoni, C.T. Calafate, „Wireless digital traffic signs of the future“, IET Networks, No. 1, Vol. 8, str. od 74 do 78, 2018.
- [8] P.C. Veena, P. Tharakan, H. Haridas, K. Ramya, R. Joju, T.S. Jyothis, „Smart street light system based on image processing“, 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), str. od 1 do 5, Nagercoil, Indija, ožujak 2016.
- [9] B. Ghazal, K. ElKhatib, K. Chahine, M. Kherfan, „Smart traffic light control system“, 2016 third international conference on electrical, electronics, computer engineering and their applications (EECEA), str. od 140 do 145, Beirut, travanj 2016.
- [10] B. Burazer, „Budućnost mobilnih komunikacija i izazovi normizacije“, 2013., Dostupno na: <https://www.hzn.hr/UserDocsImages/pdf/EIS-Budu%C4%87nost%20mobilnih%20komunikacija%20i%20izazovi%20normizacije.pdf> (16. rujna 2020.)
- [11] „Plan dodjele za frekvencijske pojaseve“, s interneta, dostupno na: <https://www.hakom.hr/default.aspx?id=474> (16. rujna 2020.)
- [12] F. Hu, „Opportunities in 5G networks: A research and development perspective“ CRC press, Boca Raton, FL, 2016.

- [13] „Što možemo očekivati od nove 5G tehnologije?“, s interneta, dostupno na: https://ec.europa.eu/croatia/content/what_can_we_expect_from_new_5G_technology_hr (16. rujna 2020.)
- [14] A. G. Kanatas, K. S. Nikita, P. T. Mathiopoulos, „New directions in wireless communications systems: From mobile to 5G“, CRC Press, Boca Raton, FL, 2017.
- [15] D. Jiang, L. Delgrossi, „IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments“, VTC Spring 2008-IEEE Vehicular Technology Conference, str. od 2036 do 2040, Singapur, svibanj 2008.
- [16] F. A. Teixeira, V. F. e Silva, J. L. Leoni, D. F. Macedo, J. M. Nogueira „Vehicular networks using the IEEE 802.11 p standard: An experimental analysis“, Vehicular Communications, No. 2, Vol. 1, str. od 91 do 96, travanj 2014.
- [17] S. Ahmadi, „5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards“, Academic Press, 2019.
- [18] I. Bošnjak, „Inteligentni transportni sustavi“, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [19] A. P. Ravšer, „Taksonomija autonomnih vozila“, Zagreb, 2016., dostupno na: <https://www.fpz.unizg.hr/prom/?p=2811> (16. rujna 2020.)
- [20] B.W. Smith, „SAE levels of driving automation“, 2013., dostupno na: <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/sae-levels-driving-automation> (16. rujna 2020.)
- [21] „OMNeT++ - Simulation Manual“, s interneta, dostupno na: https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/#toc_1 (16. rujna 2020.)
- [22] D. Renjifo, „Simulation of basic multi-hop broadcast techniques in vehicular Ad-Hoc networks using Veins simulator“, Faculty of the Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Španjolska, 2016.
- [23] „Veins Documentation“, prosinac 2018., dostupno na: <https://veins.car2x.org/documentation/> (16. rujna 2020.)

POPIS SLIKA

Slika 2. 1. Inteligentni transportni sustavi [2]	3
Slika 3. 1. Cestovni solarni moduli [4].....	7
Slika 3. 2. Pretvarači na osnovi mehaničkog stresa: a) tradicionalni most; b) činela; c) slojeviti most; d) greda na nosaču [5].	8
Slika 3.3. Princip rada sustava za iskorištavanje geotermalne energije [5].	9
Slika 3.4. Digitalni programibilni prometni znak [7].....	10
Slika 3.5. Pametna ulična rasvjeta [4].	11
Slika 3. 6. V2X komunikacija [4].	13
Slika 4. 1. Prikazuje upotrebu 5G u različite svrhe [13].	17
Slika 4. 2. Format podatkovnog okvira 802.11 standarda [15].	19
Slika 6. 1. Veins arhitektura [23].	24
Slika 7.1. Sadržaj osijek.launchd.xml datoteke.....	25
Slika 7.2. Sadržaj osijek.sumo.cfg datoteke.....	26
Slika 7.3. Izmjenjeni parametri veličine na 6000m, 4000m i 50m	26
Slika 7.4. Izmjenjen parametar <i>xmldoc</i> u osijek.launchd.xml.....	26
Slika 7.5. Kod za stvaranje plavog kruga.....	27
Slika 7.6. Kod za stvaranje žutog kruga.....	27
Slika 7.7. Prikaz vozila koje odašilje poruku	28
Slika 7.8. Prikaz vozila koje je primilo poruku.....	28

POPIS TABLICA

Tablica 4. 1. Plan dodijele za frekvencijske pojaseve preuzet s [11].	15
Tablica 4. 2. Prikaz generacije te njezinih svojstava [10, Tablica 1.]	15
Tablica 4. 3. Brzina uzlaznog i silaznog linka ovisno o 3GPP reviziji [10].	16

SAŽETAK

U ovom radu prikazana je infrastruktura inteligentnih transportnih sustava, uključujući pametne ceste, pametne prometne znakove, pametnu uličnu rasvjetu i raskrižja. Predstavljen je pregled novih tehnologija koje se ugrađuju u vozila i autonomna vozila bez vozača. Dan je prikaz razina autonomije vozila. Opisana je infrastruktura komunikacijskog sustava implementirana u Inteligentnim transportnim sustavima, te izazovi s kojima se moguće susresti pri adaptiranju istih u postojeću cestovnu infrastrukturu. Detaljnije je obrađena tehnologija mobilnih mreža četvrte i pete generacije, IEEE 802.11p standard, te V2X komunikacija. Praktični dio rada obuhvaća simulaciju odrađenu u programu VEINS koji je posrednik između programa SUMO i OMNeT++, te je tom simulacijom prikazano dijeljenje informacija među vozilima na području grada Osijeka.

Ključne riječi: autonomna vozila, inteligentni transportni sustavi, komunikacija, pametna cestovna infrastruktura, vanet

ABSTRACT

Intelligent transportation systems

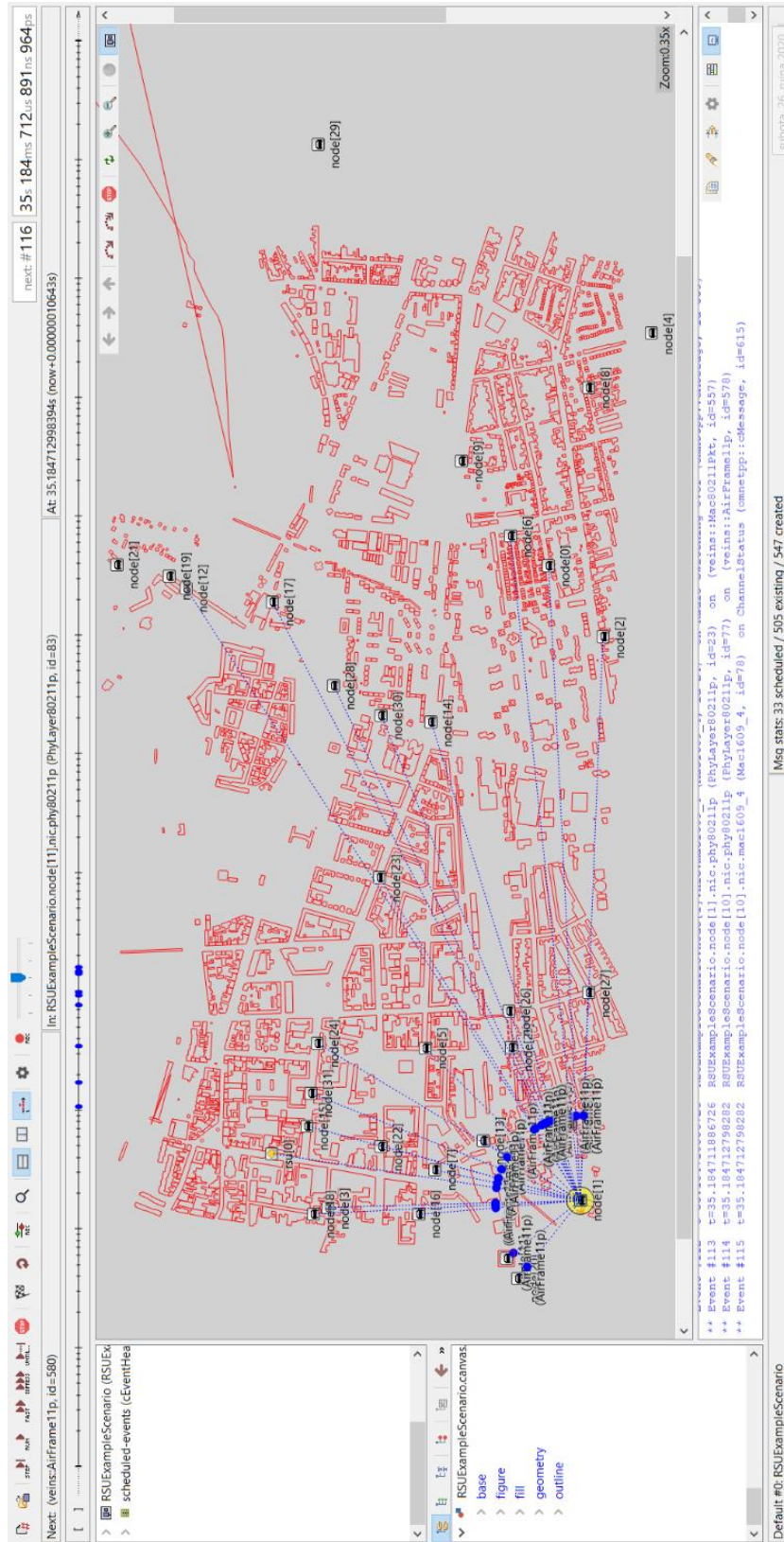
This paper presents infrastructure of intelligent transportation systems including smart roads, smart road signs, smart streetlights, and smart intersections. Overview of technologies used in autonomous vehicles is presented as well as levels of vehicle autonomy. Infrastructure of communication systems implemented in Intelligent transportation systems is described along with the challenges of adapting and implementing said infrastructure in preexisting road infrastructure. Technologies of fourth and fifth generation of mobile networks, IEEE 802.11p standard, and V2X communication are explained in more detail. Experimental part is composed of simulation made in simulation framework called VEINS, which works as the middleman between SUMO and OMNeT++ simulators, and shows information spreading among vehicles in the city of Osijek.

Key words: autonomous vehicles, communication, intelligent road infrastructure, intelligent transportation systems, vanet

ŽIVOTOPIS

Mislav Faletar rođen je 22.11.1996. godine u Bjelovaru. Pohađao je Osnovnu školu Rovišće u Rovišću, te nakon završetka upisao je Tehničku školu Bjelovar, smjer Elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole i položene državne mature, 2015. godine upisao je preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, trenutno pod nazivom "Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, te na drugoj godini odabrao smjer Komunikacije i informatika.

PRILOZI



P.7.1. Simulacija - korak 1

next: #174 35s 184ms 949us 815ns 857ps
 At: 35.18495092623s (now+0.000000276766s)

In: RSUExampleScenario.node[30].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=197)

Next: (veins:AirFrame11p, id=612)

RSUExampleScenario (RSUEx
 > scheduled-events (c-EventHea

node[29]
 node[4]
 node[21]
 node[19]
 node[12]
 node[17]
 node[28]
 node[30]
 node[14]
 node[23]
 node[27]
 node[2]
 node[20]
 node[11]
 node[10]
 node[13]
 node[7]
 node[5]
 node[16]
 node[22]
 node[26]
 node[15]
 node[18]
 node[3]
 node[4]
 node[8]
 node[9]
 node[6]
 node[1]

Zoom: 0.35x

Msg stats: 14 scheduled / 486 existing / 561 created

Default #0: RSUExampleScenario

```

** Event #171 t=35.18494758365 RSUExampleScenario.rsu[0].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=111) on selfmsg (veins:AirFrame11p, id=614)
** Event #172 t=35.184949391356 RSUExampleScenario.node[23].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=155) on selfmsg (veins:AirFrame11p, id=600)
** Event #173 t=35.184949615857 RSUExampleScenario.node[14].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=101) on selfmsg (veins:AirFrame11p, id=586)
  
```

RSUExampleScenario.canvas
 > base
 > figure
 > fill
 > geometry
 > outline

P.7.2. Simulacija - korak 2

next: #243 37s 245ms 612.Us 657ms 800ps
 At: 37.245612864704 (row+0.000000206904s)

Stop running simulation (F8)
 In: RSUExampleScenario.node[30].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=197)

RSUExampleScenario (RSUEx
 scheduled-events (EventHea

RSUExampleScenario.Canvas.
 > base
 > figure
 > fill
 > geometry
 > outline

```

** Event #240 t=37.245609605125 RSUExampleScenario.node[24].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=161) on selfmsg (resins:AirFrame11p, id=689)
** Event #241 t=37.245610901137 RSUExampleScenario.node[23].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=155) on selfmsg (resins:AirFrame11p, id=687)
** Event #242 t=37.2456126578 RSUExampleScenario.node[14].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=101) on selfmsg (resins:AirFrame11p, id=675)
  
```

Msg stats: 13 scheduled / 488 existing / 602 created

Default #0: RSUExampleScenario

Zoom: 0.35x

P.7.4. Simulacija - korak 4

next: #387 39s, 273ms 695us 827ns 456ps
 At: 39.273695300302s (row+0.000000472846s)

In: RSUEExampleScenario.node[28].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=185)

Next: (veins:AirFrame11p, id=858)

RSUEExampleScenario (RSUEx
 > scheduled-events (cEventHea

Zoom:0.35x

```

** Event #384 t=39.273693727546 RSUEExampleScenario.node[23].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=155) on selfmsg (veins:AirFrame11p, id=848)
** Event #385 t=39.273695637428 RSUEExampleScenario.node[14].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=101) on selfmsg (veins:AirFrame11p, id=832)
** Event #386 t=39.273695827456 RSUEExampleScenario.node[30].nic.phy80211p (PhyLayer80211p, id=197) on selfmsg (veins:AirFrame11p, id=860)
  
```

Msg stats: 14 scheduled / 495 existing / 686 created

Default #0: RSUEExampleScenario

- > RSUEExampleScenario.canvas
- > base
- > figure
- > fill
- > geometry
- > outline

P.7.6. Simulacija - korak 6