

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

Lucija Franković, Anamarija Jembrek, Ivana Kučina

UTVRĐIVANJE TOČNOSTI DETEKCIJE OZNAKA NA
KOLNIKU „MACHINE -VISION“ SUSTAVOM

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za prometnu signalizaciju pod mentorstvom dr. sc. Darija Babića i predan je na Natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./2021.

Rad je izrađen u sklopu projekta pod nazivom „Utvrđivanje metodologije testiranja i evaluacije ADAS sustava“ financiranog iz programa Potpore za temeljno financiranje znanstvene i umjetničke djelatnosti Sveučilišta u Zagrebu u ak. god. 2019./2020 (Drugi krug - Znanstvena izvrsnost) voditelja dr. sc. Darka Babića.

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OPĆENITO O NAPREDNIM SUSTAVIMA POMOĆI VOZAČU.....	4
2.1.	Podjela naprednih sustava pomoći vozaču	5
2.2.	Zakonska regulativa	12
2.3.	Potencijalni rizici, prednosti i nedostaci ADAS sustava	14
3.	SUSTAVI PREPOZNAVANJA OZNAKA NA KOLNIKU	18
3.1.	Princip rada.....	19
3.2.	Ograničenja i problemi u radu	21
4.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	22
5.	METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	26
5.1.	Istraživačka oprema	26
5.2.	Testne dionice i procedure ispitivanja.....	28
6.	ANALIZA PODATAKA	29
6.1.	Test 1 – Utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima	29
6.2.	Test 2 – Usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta.....	30
7.	REZULTATI.....	31
7.1.	Test 1 – Utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima	31
7.2.	Test 2 – Usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta.....	33
8.	RASPRAVA	39
9.	ZAKLJUČAK.....	43
10.	ZAHVALE.....	45
	LITERATURA	46
	SAŽETAK.....	51

SUMMARY	52
POPIS SLIKA, TABLICA I GRAFIKONA	53

1. UVOD

Promet predstavlja bitan čimbenik razvoja i funkcioniranja ljudskoga društva koji direktno djeluje na naseljenost, proizvodnju, razmjenu i potrošnju te ostale društvene aktivnosti. Danas u globalnom povezanom društvu gospodarstvo, kultura i životni standard ovise o prometnoj povezanosti. Međutim, sve veća mobilnost ljudi nosi za sobom i određene posljedice koje su primarno vezane uz sigurnost prometnog sustava. Naime, na globalnoj razini godišnje smrtno strada oko 1,35 milijuna ljudi od posljedica prometnih nesreća, dok između 20 i 50 milijuna ljudi zadobije određene ozljede [1]. Upravo je iz navedenog razloga sigurnost prometa jedan od glavnih strategijskih ciljeva gotovo svih zemalja svijeta.

U Europskoj uniji 2019. godine u prometnim nesrećama na cestama poginulo je 22 800 ljudi što je oko 7 000 smrtnih slučajeva manje u odnosu na 2010. godinu. Pad smrtnih slučajeva od 23 % rezultat je značajnih napora i proaktivnih mjera i programa usmjerenih na četiri područja djelovanja: a) promjenu ponašanja sudionika u prometu, b) bolju cestovnu infrastrukturu, c) sigurnija vozila, i d) učinkovitiju medicinsku skrb nakon prometnih nesreća [2]. Iako je značajan napredak ostvaren, zacrtani cilj od 50 % manje smrtno stradalih u prometu na cestama Europske unije u periodu od 2010. do 2020. godine ipak nije ostvaren [3].

U svibnju 2018. godine Europska je komisija u paketu „Europa u pokretu“ (engl. *Europe on the Move*) predstavila novi pristup politici sigurnosti cestovnog prometa Europske unije zajedno sa srednjoročnim Strateškim akcijskim planom. U svrhu unaprjeđenja trenutne situacije i približavanja dugoročnom cilju od nula smrtnih slučajeva do 2050. godine politika sigurnosti cestovnog prometa u Europskoj uniji za period 2021. – 2030. temelji se na pristupu „Sigurni sustav“ (engl. *Safe System Approach*). Navedeni pristup podrazumijeva postavljanje jasnih ciljeva, praćenje napretka uz pomoć niza ključnih pokazatelja uspješnosti te koordinirano djelovanje svih sektora i svih sudionika u prometu [4].

Pojednostavljeno rečeno cestovni promet promatra se pomoću triju osnovnih čimbenika: čovjek, cesta i vozila. Kako je čovjek po prirodi sklon pogreškama, dugo se godina smatralo da je on glavni uzročnik prometnih nesreća i da je oko 85 % svih nesreća uzrokovano upravo ljudskom pogreškom, dok su svi ostali čimbenici činili oko 15 % [5].

Ipak, noviji znanstveni pristupi ukazuju na to da ljudske pogreške mogu biti uzrokovana djelovanjem ostalih čimbenika kao što su cesta ili vozilo. Prema analizi kritičnih čimbenika nastanka prometnih nesreća u RH utvrđeno je da je 57 % prometnih nesreća sa smrtnim

posljedicama uzrokovano ljudskom greškom, dok je međudjelovanje prometne infrastrukture i čovjeka uzrokovalo čak 35 % nesreća sa smrtno stradalima [6].

Značajan napredak u povećanju sigurnosti cestovnog prometa, uslijed tehnološkog napretka, očekuje se unaprjeđenjem sigurnosnih sustava vozila te automatiziranjem određenih segmenata vožnje. Naime, suvremena vozila opremljena su različitim pasivnim i aktivnim sustavima. Pasivni sustavi ublažavaju posljedice prometne nesreće, odnosno ozljede putnika, dok, s druge strane, aktivni sustavi pokušavaju držati kontrolu nad vozilom i na taj način spriječiti nastanak prometne nesreće. U skupinu aktivnih sustava ubrajaju se i napredni sustavi pomoći vozaču (engl. *Advanced Driver Assistance Systems* – ADAS) koji postaju sastavni dio opreme današnjih vozila.

ADAS sustavi obavljaju različite zadatke i pomažu vozaču tijekom vožnje, a svoj rad temelje na percepciji pomoću kamera, radara, lidara te drugih senzora koji percipiraju statički i dinamički sadržaj okoline oko vozila. Uobičajene funkcije ADAS-a uključuju prilagodljivu kontrolu brzine, upozorenje o napuštanju prometne trake, pomoć pri zadržavanju vozila u prometnoj traci, upozorenje na mogući frontalni sudar, automatsko paljenje dugih svjetla, prepoznavanje prometnih znakova, otkrivanje pješaka i predmeta u okolini, automatsko kočenje u nuždi itd.

S obzirom na to da oznake na kolniku, zajedno s prometnim znakovima, predstavljaju osnovna sredstva komunikacije između upravitelja cesta i sudionika u prometu, najčešće korišteni ADAS sustavi upravo su usmjereni na njihovo detektiranje i prepoznavanje. Detektiranje oznaka na kolniku koristi se za upozoravanje vozača tijekom napuštanja prometne trake i/ili za pomoć vozaču pri zadržavanju lateralnog položaja vozila unutar kolničke trake. Glavna svrha navedenih sustava jest spriječiti prometne nesreće uzrokovane izlijetanjem vozila s ceste ili ulaskom u suprotni prometni trak. Naime, prometne nesreće uzrokovane napuštanjem vozne trake predstavljaju jedne od najčešćih nesreća s najtežim posljedicama. U SAD-u čak 51 % nesreća sa smrtnim slučajevima uzrokovano je napuštanjem vozne trake [7], dok u RH navedeni udio iznosi 45 % [6]. S obzirom na to da je stopa takvih prometnih nesreća velika, upotrebom navedenih sustava moguće je značajno poboljšati sigurnost prometa na cestama [8, 9, 10].

Međutim, kvaliteta detekcije oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom ovisi o nizu čimbenika kao što su: kvaliteta kamere, stanje, boja, širina i vidljivost oznaka na kolniku (dnevna vidljivost, noćna vidljivost - retrorefleksija i kontrast), konfiguracija označavanja (puna/isprekidana linija, duljina isprekidanih linija), brzina vožnje, vremenski uvjeti, općenita

vidljivost okoline, smjer sunčevih zraka, karakteristike kolnika (vrsta, stanje i tekstura), geometrija ceste, vrsta ruba ceste (strukturirano/nestrukturirano) i kombinacija gore navedenih čimbenika [8, 9, 11].

Zbog „mladosti“ same tehnologije, utjecaj navedenih čimbenika još uvijek nije jasno identificiran i kvantitativno definiran. Jedan od takvih čimbenika vidljivost je oznaka na cestama (dnevna i noćna) koja se općenito smatra najvažnijom karakteristikom oznaka [12]. Upravo je iz tog razloga cilj ovog rada utvrditi na koji način dnevna i noćna vidljivost oznaka na kolniku utječe na sustav detekcije oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom implementiranim u vozilo. Prema navedenom glavna hipoteza rada glasi: dnevna i noćna vidljivost oznaka na kolniku značajno utječe na kvalitetu detekcije oznaka na kolniku u dnevnim i noćnim uvjetima. Uz glavnu hipotezu definirane su i pomoćne hipoteze rada:

- detekcija oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom kvalitetnija je u dnevnim uvjetima u odnosu na noćne uvjete,
- s povećanjem retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku dolazi do njihove kvalitetnije detekcije „machine-vision“ sustavom u noćnim uvjetima,
- udaljenost na koju „machine-vision“ sustav detektira oznake na kolniku ovisi o vidljivosti oznaka na kolniku, ali i o geometriji ceste.

Kako bi se ispitala ispravnost navedenih hipoteza rada provedeno je mjerenje na nekoliko testnih dionica u Republici Hrvatskoj uz pomoć dinamičkog reflektometra i Mobileye kamere. Provedena su dva testa: 1) utjecaj retrorefleksije oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima i 2) usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta.

Rad je strukturno podijeljen na osam poglavlja. U prvom su poglavlju izneseni cilj i hipoteze ovog rada, dok se drugo poglavlje odnosi na napredne sustave pomoći vozaču. U trećem poglavlju prikazan je pregled dosadašnjih istraživanja „machine-vision“ sustava. Četvrto poglavlje objašnjava princip rada sustava prepoznavanja oznaka na kolniku i ograničenja i moguće probleme do kojih dolazi pri prepoznavanju oznaka. Metodologija istraživanja, odnosno oprema koja se koristila pri istraživanju i dionice na kojima se ono provodilo, opisani su u petom poglavlju. Analiza podataka u šestom je poglavlju i opisuje način obrade podataka za svaki provedeni test. U sedmom poglavlju iznesena je rasprava koja se odnosi na predstavljene rezultate iz prethodnog poglavlja, dok se u osmom poglavlju prikazuju spoznaje do kojih je analiza dovela.

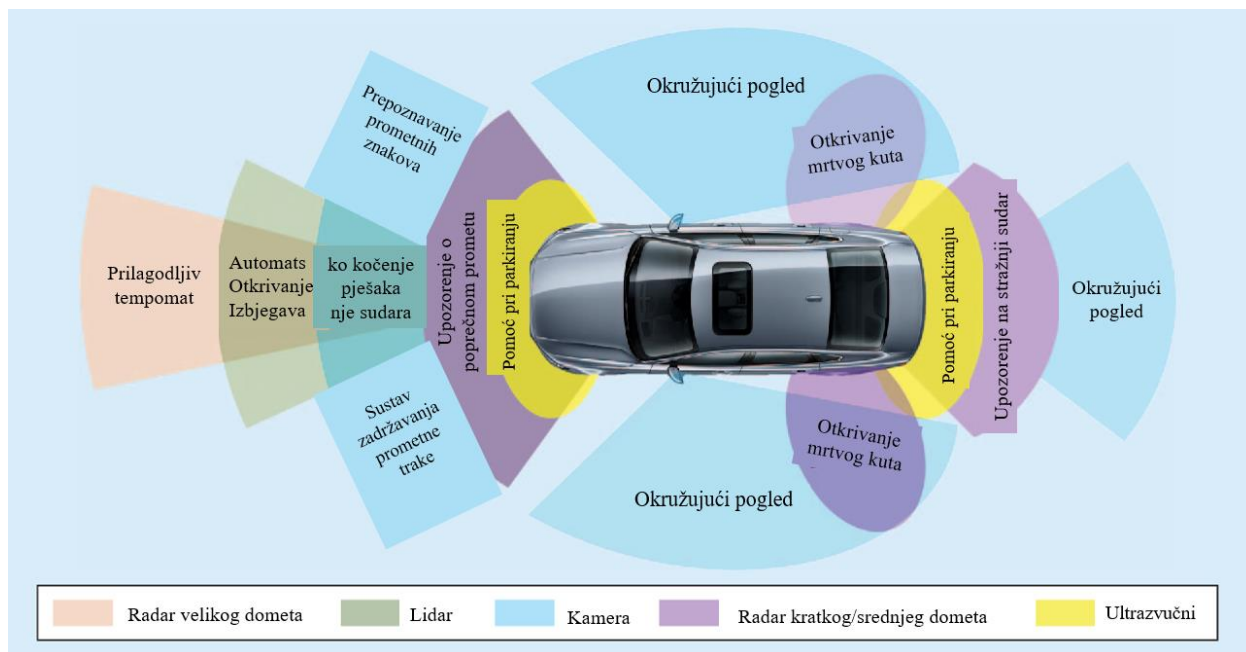
2. OPĆENITO O NAPREDNIM SUSTAVIMA POMOĆI VOZAČU

Napredni sustavi pomoći vozaču (ADAS) nadgledanjem i kontroliranjem raznih parametara vozila i njegove okoline otkrivaju potencijalne opasnosti na cesti, a razvijeni su za unaprjeđenje cjelokupne sigurnosti cestovnog prometa. Početku primjene naprednih sustava vozaču pridonijeli su razvoj računala, tehnologija pohranjivanja podataka, razvoj softvera i napredak u tehnologiji senzora koji su se počeli naglo razvijati tijekom 20. stoljeća. Sustavi za pomoć vozaču prvi se put koriste u zrakoplovstvu 1920-ih godina ABS (engl. *Anti-lock braking system*) sustavom, a tek 1970-ih taj sustav počinje se koristiti i na automobilima kada se uvodi u serijsku proizvodnju [13].

Važnost ADAS sustava na vozilu prepoznata je vrlo brzo, stoga su provedena mnogobrojna testiranja kako bi se evaluirala njihova primjena. Tako je 1977. godine Tsukuba Mechanical Engineering Lab u Japanu kreirao prvi inteligentni automobil koji je mogao prepoznati bijele oznake na kolniku uz pomoć dviju kamera. Osim toga u periodu od 1986. do 1995. European Research Initiative financirala je 749 milijuna dolara vrijedan program nazvan PROMETHEUS. U projektu je 1994. godine predstavljen automatizirani kombi sposoban za vožnju u uobičajenom prometu, promjenu prometne trake i pretjecanje ostalih vozila [13].

Glavni koraci na putu razvoja senzora na ADAS sustavima mogu se klasificirati kao proprioceptivni senzori, eksteroceptivni senzori i senzorske mreže. Proprioceptivni senzori bili su sposobni otkriti i reagirati na opasnu situaciju analizom ponašanja vozila, dok su eksteroceptivni senzori poput ultrazvučnih, radarskih, lidara, infracrvenih i vizualnih senzora sposobni reagirati u ranijoj fazi i predvidjeti moguće opasnosti [14].

Daljnji razvoj i tehnološki napredak posljednjih je godina omogućio razvoj niza različitih naprednih sustava pomoći vozaču koji se temelje na različitim principima rada kao što su kamere, radari, ultrazvučni senzori i lidari (Slika 1.). Neki sustavi samo upozoravaju vozača vizualnim, zvučnim ili haptičkim signalom na opasnost koja mu prijete tijekom vožnje, dok drugi, osim upozorenja u izvanrednim situacijama koje su posljedica pogrešaka i/ili nepažnje, preuzimaju kontrolu nad vozilom kako bi izbjegli prometnu nesreću ili smanjili njene posljedice.



Slika 1. Princip rada naprednih sustava pomoći vozaču

Izvor: [15]

Glavni je cilj navedenih sustava smanjiti broj prometnih nesreća, umanjiti težinu njihovih posljedica, kao i omogućiti potpuno autonomnu vožnju u bliskoj budućnosti. Naime, trenutno u primjeni ADAS sustavi u pravilu ne djeluje samostalno, već vozačima pružaju dodatne informacije o prometnoj situaciji pomažući im na taj način prilikom vožnje. Sinkronizacija radnji vozača i informacija iz okoline, kao i prepoznavanje trenutne situacije i mogućih manevriranja vozilom, presudno je za učinkovito izvođenje različitih aplikacija ADAS-a.

2.1. Podjela naprednih sustava pomoći vozaču

Kako bi ADAS sustav mogao funkcionirati, senzor bi trebao prikupiti potrebne podatke o fizičkim parametrima povezanim s automobilom, okruženjem i vozačem. Danas se koristi široka paleta ADAS tehnologija od kojih su neke ugrađene u vozila kao standardna oprema.

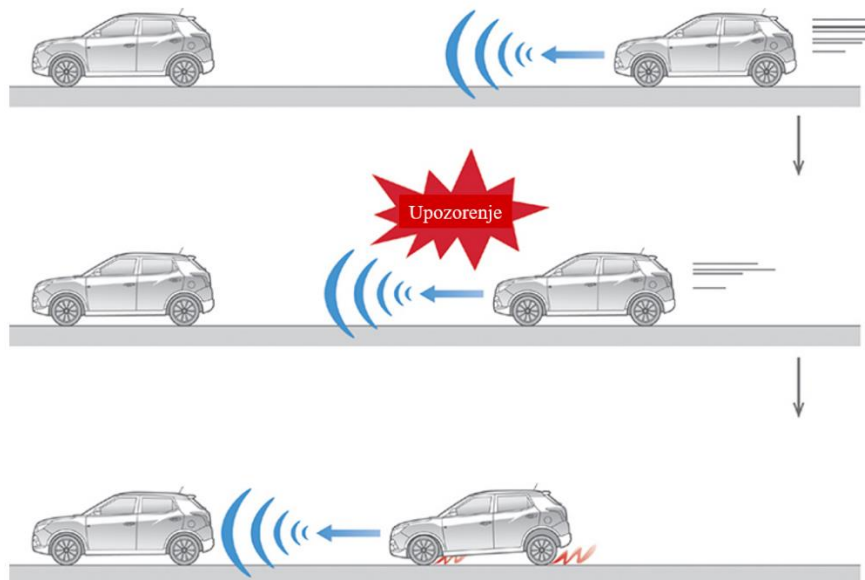
Sustav kontrole na sudar sprijeda - FCW (engl. *Forward Collision Warning*) sustav je upozorenja na frontalni sudar, odnosno sustav namijenjen pomaganju vozača u izbjegavanju i ublažavanju frontalnih sudara pomoću zvučnih, vizualnih i haptičkih upozorenja ili njihove kombinacije. Navedeni sustav pomoću radara, lidara i kamera omogućuje detekciju vozila i na temelju dobivenih informacija sustav upozorava vozača (Slika 2.)[16].



Slika 2. Sustav upozorenja na prednji sudar

Izvor: [17]

Sustav automatskog kočenja - AEB (engl. *Automatic Emergency Brake*) automatska je kočnica u nuždi ili upozorenje na sudar s automatskom kočnicom. To je inteligentan i složen sustav koji ima mogućnost automatskog primjenjivanja snage kočenja bez intervencije vozača. Navedeni sustav prikazan na slici 3. kontinuirano nadgleda područje ispred vozila i u slučaju prepoznavanja ozbiljne mogućnosti nastanka sudara upozorava vozača da započne kočenje, dok se kočnice unaprijed aktiviraju. U slučaju da vozač na kritičnoj udaljenosti ne započne kočenje, sustav automatski primjenjuje što veću snagu kočenja kako bi zaustavio vozilo ili smanjio brzinu vozila i mogućnost nastanka prometne nesreće. Za nadziranje stražnjih dijelova vozila ispred koriste se senzori kratkog dometa ili radarski senzori velikog dometa. Senzori kratkog dometa jeftiniji su i rade do brzine 50 km/h, dok su radarski senzori velikog dometa neophodni za prilagodljiv tempomat jer mogu prepoznati kritične situacije i raditi pri brzinama do 200 km/h. Podaci navedenih senzora tumače se u upravljačkoj jedinici kako bi se mogle poduzeti odgovarajuće radnje [16].



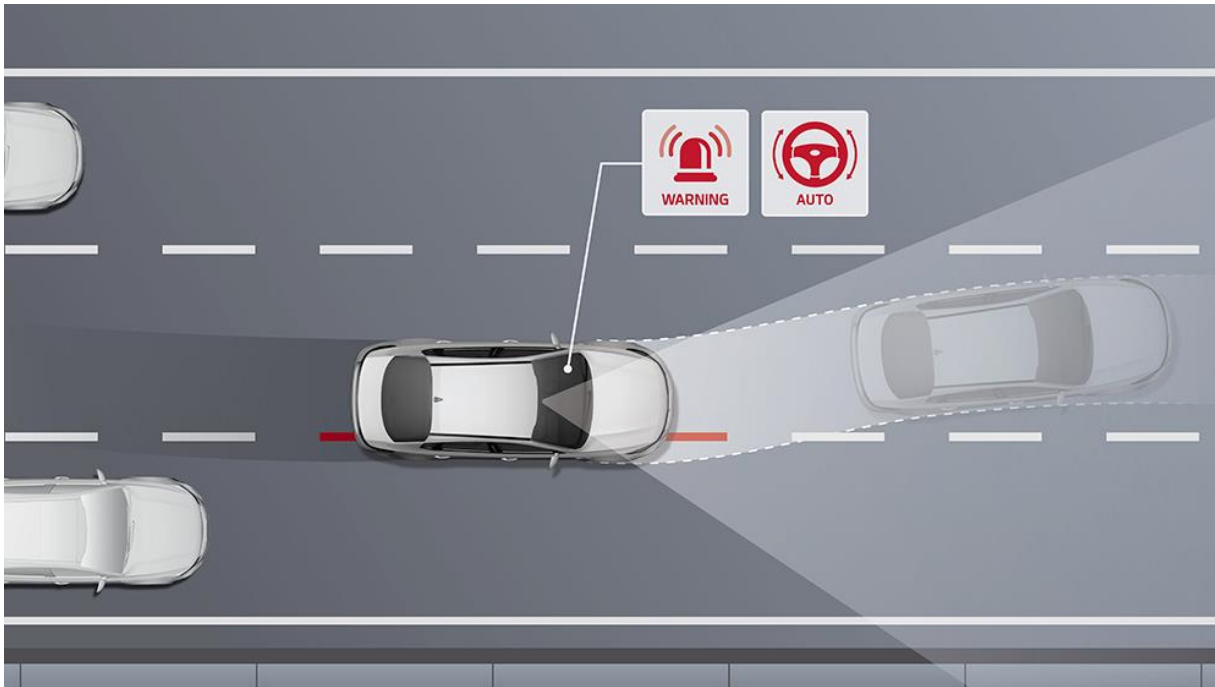
Slika 3. Sustav automatske kočnice u nuždi

Izvor: [18]

Prilagodljiv tempomat - ACC (engl. *Adaptive Cruise Control*) jednostavan je sustav koji omogućuje vozačima prilagodbu brzine i udaljenosti od vozila ispred bez korištenja papučice gasa ili kočnice. Nedostatak korištenja ACC sustava je što vozač tada ne usmjerava dovoljno pažnje na vožnju i kod neočekivanih opasnosti može kasno reagirati ili se uspaničiti i izazvati prometnu nesreću. Prve verzije toga sustava temeljile su se na laseru, ali su na pouzdanost značajno utjecali loši vremenski uvjeti. Iz navedenih razloga današnji AAC sustavi koriste radar velikog dometa koji radi u širem rasponu vremenskih uvjeta i može prepoznati nereflektirajuća vozila. Navedeni radari rade u dometu do 200 m, ali i u uskom dometu. Nadalje, danas proizvođači automobila koriste kombinaciju radara dugog dometa s radarom kratkog dometa ili s optičkim sustavom za pokrivanje šireg dometa. Jeftini sustavi ne podržavaju zaustavljanje i kretanje, odnosno vozilo se ne može automatski potpuno zaustaviti i zatim nastaviti putovanje. Sofisticiraniji sustavi imaju i ultrazvučne senzore kratkog dometa koji se koriste pri maloj brzini za dobivanje preciznijih informacija. Takvi sustavi mogu automatski zaustaviti vozilo i zatim nastaviti putovanje npr. spora vožnja u koloni [16].

Sustav za održavanje vozila unutar kolničke trake - LKS (engl. *Lane Keeping System*) ili LKA (engl. *Lane Keeping Assistance*) i sustav za pomoć pri promjeni trake sustavi su dizajnirani za pomoć vozača pri održavanju lateralnog položaja vozila - LCA (engl. *Lane Change Assistant*) ili LDW (engl. *Lane Departure Warning*) [19]. Navedeni sustavi koriste kamere za određivanje položaja vozila u odnosu na prometne trake (oznake na kolniku). S

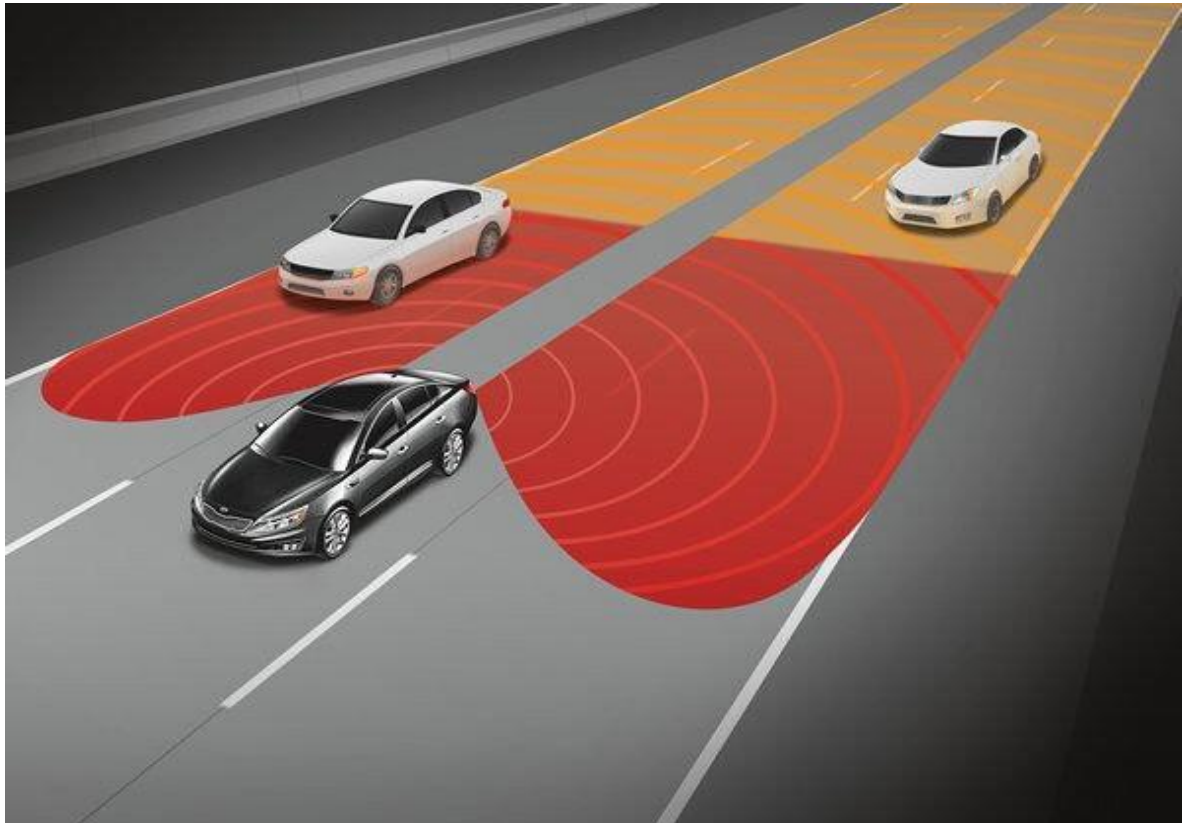
obzirom na to da se oslanjanju na optičko prepoznavanje, osjetljivi su na kvalitetu oznaka na kolniku i vremenske uvjete. LKS sustav prikazan na slici 4. predstavlja proaktivni sustav za upozoravanje vozača kada može započeti mijenjanje prometne trake, a osim toga može i okretati upravljač i tako kontrolirati smjer kretanja vozila te time smanjiti mogućnosti nastanka prometnih nesreća kod nedovoljne pažnje vozača. Senzori u uobičajenim automobilima višenamjenske su mono kamere ili višenamjenske stereo kamere. Prednosti stereo kamera su što mogu prepoznati 3D predmete, trake i moguće prepreke [16].



Slika 4. Sustav za zadržavanje prometne trake

Izvor: [20]

Sustav za nadzor mrtvog kuta - BSD (engl. *Blind Spot Detection*) ili BSW (engl. *Blind Spot Warning*) sustav je otkrivanja predmeta unutar mrtvog kuta nadziranjem područja pokraj vozila (Slika 5.). Funkcija sustava za otkrivanje mrtvog kuta upozoriti je vozača zvučnim ili vizualnim signalom npr. znak u bočnom zrcalu, ako je vozilo otkriveno u mrtvom kutu dok je uključen žmigavac. Cilj ovog sustava izbjeći je potencijalne nesreće, posebno tijekom manevriranja kod promjene prometne trake u gustom prometu [14].



Slika 5. Sustav otkrivanja vozila unutar mrtvog kuta

Izvor: [21]

Sustav detekcije stražnjeg poprečnog prometa - RCTA (engl. *Rear Cross Traffic Alert*) služi za upozorenje o stražnjem poprečnom prometu, odnosno za pomaganje vozaču u izbjegavanju nesreća pri izlasku vozila s parkirališnog mjesta. Za ovu funkciju nadzire se okoliš iza vozila i provjerava se ima li predmeta u navedenom području. Navedeni sustav u slučaju detekcije objekta iza vozila zvučnim i vizualnim signalima upozorava vozača na potencijalnu opasnost (Slika 6.) [14].

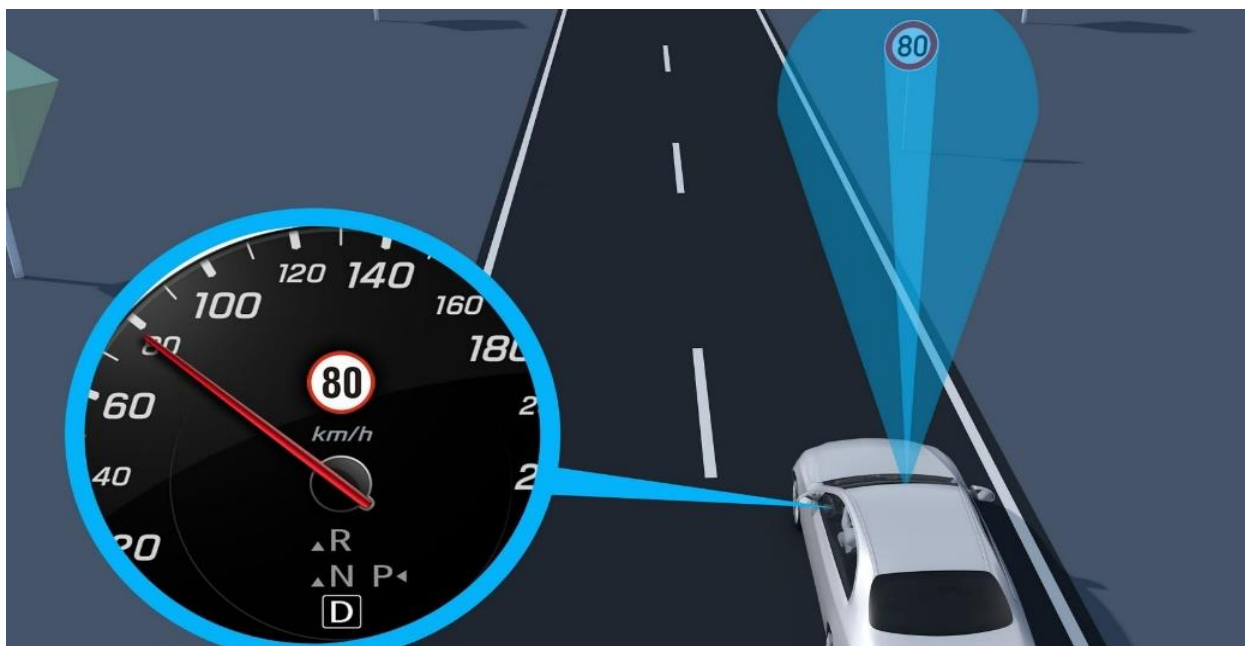


Slika 6. Upozorenje o stražnjem poprečnom prometu

Izvor: [22]

Sustav inteligentne kontrole prednjih svjetala - IHC (engl. *Intelligent Headlamp Control*) sustav je koji automatski regulira svjetla vozila prema uvjetima okoline. Navedeni sustav optimizira promjene između dugih i kratkih svjetala tijekom noćnih vožnji. Vožnja noću ili kroz tunele stoga je ugodnija i sigurnija, a vozači iz suprotnog smjera nisu zaslijepljeni [14].

Sustav prepoznavanja prometnih znakova - TSR (engl. *Traffic Sign Recognition*) sustav je koji automatski detektira i prepoznaje prometne znakove te ih prikazuje vozačima (Slika 7.). Na taj način pomaže vozaču u održavanju propisanih brzina vožnje i omogućava mu opušteniju i ujedno sigurniju vožnju [14].



Slika 7. Sustav za automatsko prepoznavanje prometnih znakova

Izvor: [23]

Sustav prilagodljivog tempomata s funkcijama stani/kreni - ACC + S&G (engl. *Adaptive Cruise Control with Stop & Go functions*) sustav je koji kontrolira udaljenost do vozila ispred, čak i u stani-kreni situacijama, upozorava vozača ili aktivno usporava brzinu vozila, ako relativna udaljenost postane premala. Jedna od prednosti navedenog sustava ugodnija je vožnja, dok je sigurnost poboljšana unaprijed definiranom udaljenosti i upozorenjem potrebnog kočenja u nuždi [14].

Inteligentni sustav kontrole brzine - ISA (engl. *Intelligent Speed Adaptation*) je sustav je koji obavještava i upozorava vozača o zakonskim ograničenjima brzine na kritičnim sigurnosnim točkama. Ograničenje brzine u vozilu postavlja se automatski s obzirom na to koliko je naznačeno ograničenje na određenoj dionici ceste. Sustav se temelji na GPS-u¹ povezanim s digitalnim mapama ograničenja kao i na sustavu prepoznavanja prometnih znakova. Postoje tri vrste ISA sustava. Informativni ili savjetodavni ISA sustav daje vozaču povratne informacije putem vizualnog ili zvučnog signala o trenutnim ograničenjima brzine i ako je trenutna brzina veća od ograničenja. Podržavajući ili upozoravajući ISA sustav pri pritisku povećava otpor papučice gasa kako bi upozorio vozača na prekoračenje brzine. Zadnja vrsta ISA sustava intervencijski je ISA sustav koji sprječava bilo kakvu brzu vožnju, na primjer,

¹ GPS (engl. *Global Positioning System*) – satelitski radionavigacijski sustav za precizno određivanje položaja bilo gdje na Zemlji

smanjenjem ubrizgavanja goriva ili zahtjevom za trzaj vozača ako želi prekoračiti ograničenje [23].

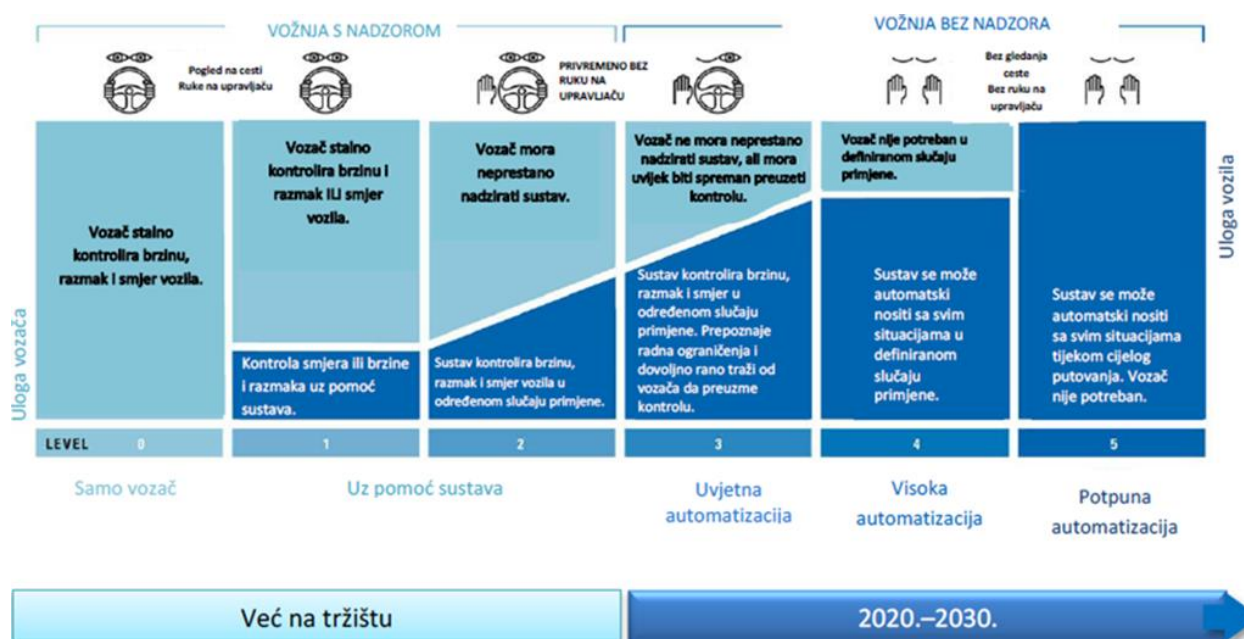
Sustav elektroničke kontrole stabilnosti - ESC (engl. *Electronic Stability Control*) aktivni je sigurnosni sustav koji se može ugraditi u automobile, autobuse i kamione te predstavlja produžetak tehnologije protiv blokade kotača. Cilj je sustava stabilizirati vozilo i spriječiti proklizavanje u svim uvjetima i situacijama vožnje, naravno, unutar fizičkih ograničenja. Rad sustava temelji se na identificiranju kritičnih situacija u vožnji i primjenjivanju specifičnog pritiska kočnice na jedan ili više kotača [23].

Osim navedenih sustava danas se koriste i sustavi za blokadu pokretanja vozila u slučaju alkoholiziranosti vozača, upozoravanje vezano uz sigurnosni pojas, sprječavanje distrakcije vozača kao i snimači podataka u vozilu koji prikupljaju podatke tijekom razdoblja prije i nakon prometnih nesreća [16].

2.2. Zakonska regulativa

Pravna pitanja koja pokreću ADAS sustavi javljaju se zbog različitih pristupa automatizaciji i klasifikaciji istih. Drugim riječima, pravno i sigurnosno gledano nije jednako ako je vozilo opremljeno sustavima koji samo pružaju upozorenja vozaču ili sustavima koji mogu preuzeti kontrolu nad vozilom i samostalno upravljati njime. Kako bi se odredile te granice Međunarodno udruženje automobilskih inženjera - SAE (engl. *Society of Automotive Engineers*) klasificiralo je pet razina automatizacije vozila na temelju stupnja intervencije i razine vozačeve pažnje tijekom vožnje (Slika 8.). Navedene razine su [24]:

- razina 0 - vozač je zadužen za sve radnje,
- razina 1 i 2 - sustavi na vozilu koji mogu ponekad asistirati vozaču pri obavljanju nekih zadataka u vožnji, a vozač mora neprestano nadzirati sustav,
- razina 3 - vozač je samo operator koji nadzire funkcioniranje sustava te preuzima kontrolu ako sustav zakaže ili napravi pogrešku,
- razina 4 i 5 - vozač nema zadatak kontrolirati vozilo; razina 4 odnosi se na ograničenu okolinu (npr. samo autoceste), a razina 5 nije ograničena.



Slika 8. Klasifikacija automatizacije

Izvor: [25]

Primarna zadaća vozača tijekom vožnje longitudinalna je i lateralna kontrola vozila koja uključuje upravljanje, ubrzavanje i kočenje. Promjenom razina vozač je oslobođen zadatka vožnje, djelomično ili potpuno. Prema tome na razini 0 vozač je u potpunoj kontroli i obavlja sve zadaće. Razina 1 i 2 vrlo su slične, a razlika je u tome što razina 1 može preuzeti kontrolu nad jednom funkcijom, a razina 2 može preuzeti kontrolu nad više funkcija kako bi pomogla vozaču. Na primjer, kamera koja prikazuje prostor iza automobila razina je 1, a ako uz sliku daje i upozorenje, onda je to razina 2. Na razini 3 sustavi pružaju opsežniju pomoć vozaču na način da kontroliraju vozilo i izbjegavaju nesreće bez naredbe vozača (npr. prilagodljiv tempomat i sustav automatskog kočenja). Četvrta razina uključuje vozila s vozačem (npr. autopilot za autocestu) ili bez vozača (npr. vozila za prijevoz putnika na zadanim relacijama), dok peta razina predstavlja u potpunosti autonomna vozila. Trenutna generacija ADAS sustava kombinira prilagodljiv tempomat i sustav za održavanje vozila unutar kolničke trake kako bi postigla jednu vrstu autopilota koji u određenim uvjetima omogućava vozilu samostalno upravljanje, kočenje i ubrzanje [26].

U prošlosti postepenim razvojem automatizacije stvarala se potreba za razvojem zakonodavstva koje bi reguliralo korištenje novih tehnologija na vozilima. Da bi se omogućio razvoj automatiziranih vozila u Europskoj uniji, potrebno je definirati odgovarajući pravni okvir. U tu svrhu Europska komisija priprema prijedloge za zakonodavstvo Europske unije koje onda usvajaju države članice. Tehničke propise o vozilima definira UNECE (engl. *United*

Nations Economic Comission for Europe), a unutar UNECE-e postoji nekoliko radnih skupina koje pripremaju propise i zajedno s predstavnicima proizvođača automobila, dobavljačima i vlastima dogovaraju tehničke zahtjeve. Propisi reguliraju minimalnu zahtijevanu sigurnost automatiziranih vozila manje usmjerenim na konstrukciju, a više prilagođenim razvojnoj prirodi tih vozila. Nakon odobravanja proizvođači smiju proizvoditi vozila koja su u skladu s tim propisima i prodavati ih na tržištu. Mnogi proizvođači automobila izvan Europske unije također su članovi UNECE-e uključujući Sjedinjene Američke Države, Japan, Južnu Koreju itd. [24].

U Europskoj uniji napredni sustavi postat će obavezni za sva nova vozila od svibnja 2022. godine, a za postojeće modele vozila od 2024. godine. Zakonskom regulativom obuhvaćeni su sljedeći sustavi: inteligentni sustav kontrole brzine, sustav za olakšavanje ugradnje uređaja za blokadu u slučaju vožnje pod utjecajem alkohola, sustav za upozoravanje u slučaju pospanosti i manjka pozornosti vozača, napredni sustav za upozoravanje u slučaju odvratanja pozornosti vozača, signal za zaustavljanje u nuždi, sustavi detekcije stražnjeg poprečnog prometa i uređaj za snimanje podataka o događajima („crna kutija“). Prema procjenama samo inteligentnim sustavom za pomoć pri kontroli brzine (ISA) u EU-u mogao bi se smanjiti broj smrtnih slučajeva na cestama za 20 % [24].

Za osobna i laka gospodarska vozila također će biti obavezan sustav za kočenje u nuždi, koji je već obavezan za teretna vozila i autobuse, kao i sustav za održavanje vozila u prometnoj traci. Većina tih tehnologija i sustava trebali bi postati obavezni od svibnja 2022. za nove modele i od svibnja 2024. za postojeće modele. Kamioni i autobusi morat će se dizajnirati i izraditi tako da su ranjivi sudionici u prometu, poput biciklista i pješaka, vozaču vidljiviji tzv. izravnim vidom. Tehnologija izravnog vida trebala bi se primjenjivati na nove modele od studenog 2025., a na postojeće modele od studenog 2028. godine [27].

2.3. Potencijalni rizici, prednosti i nedostaci ADAS sustava

Kao što je već navedeno, primjenom naprednih sustava pomoći vozaču moguće je u značajnoj mjeri smanjiti broj prometnih nesreća i povećati sigurnost prometa. Prisutnost ADAS sustava iznimno je važna, što potvrđuje činjenica da sve više sustava postaje obavezno na novim vozilima. Istraživanja su pokazala da ako bi sustavi kao što su sustav kontrole na sudar sprijeda, sustav automatskog kočenja, sustav upozorenja o napuštanju prometne trake, sustav za zadržavanje unutar prometne trake i sustav za nadzor mrtvog kuta bili implementirani na svim vozilima, prevenirali bi oko 40 % svih nesreća u kojima sudjeluju osobna vozila, 37 % svih

nesreća s ozlijeđenim osobama i 29 % svih nesreća sa smrtnim ishodom. Osim što su vrlo važan sigurnosni element vozila, ADAS sustavi doprinose boljoj učinkovitosti prometa smanjujući njegovo zagušenje i doprinose manjoj emisiji štetnih plinova. Nadalje, mogu biti izrazito korisni za pružanje osobnog asistiranja u cestovnom okruženju starijim vozačima i/ili osobama smanjenih mogućnosti. Naime, stariji vozači teže procjenjuju brzinu drugih vozila u prometu, teže opažaju vozila pri promjeni trake ili ostalih prometnih radnji, kao i elemente prometne signalizacije i sporije reagiraju u složenim prometnim situacijama. Navedene poteškoće potječu zbog funkcionalnih ograničenja kao što su smanjena percepcija pokreta, slabiji periferni vid, loša mobilnost vrata i glave, sporija brzina reakcije i brzina donošenja odluka. ADAS sustavi u vozilu mogu nadomjestiti ta ograničenja i smanjiti sudjelovanje starijih vozača u prometnim nesrećama [19].

Iako ADAS sustavi dokazano pridonose smanjenju broja prometnih nesreća, stvarna učinkovitost sustava ovisi o vozačevom razumijevanju njihovog rada i međusobnoj interakciji između vozača i sustava. Prema tome, pri korištenju ADAS sustava na vozilu prisutni su rizici uzrokovani promjenom vozačeve uloge u vožnji jer on postaje osoba koja ima zadaću nadzirati vožnju umjesto da, kao pri vožnji konvencionalnih automobila, upravlja vozilom. Vozač bi pri nadziranju vožnje trebao biti svjestan događaja u prometu u njegovoj okolini, pratiti ponašanje sustava i intervenirati ako uoči njegove nedostatke. Ipak, vozači u toj ulozi zapravo propuštaju veliku količinu detalja iz okoline koje bi kao aktivni vozači sigurno primijetili. Prekomjerno praćenje statusa sustava i njegovog djelovanja ili, s druge strane, nepažnja i pretjerano oslanjanje na sustav uzrokuju vozačevu lošiju svjesnost o situaciji na cesti, što dovodi do smanjenog vremena reakcije (šest sekundi u nekim slučajevima, za razliku od aktivnih vozača kojima je potrebno oko dvije sekunde) [28].

Nadalje, nedostatak ADAS sustava je i to što su isti dostupni svim vozačima, odnosno ne zahtijevaju dodatnu obuku vozača prije njihova korištenja, što znači da vozač automobila opremljenog ADAS sustavom može upravljati njime bez ikakvog prethodnog znanja kako on radi. To nužno ne predstavlja problem jer su neki sustavi dovoljno jasni i intuitivni. Međutim, rezultati istraživanja Američke automobilske asocijacije (engl. *American Automobile Association*) iz 2018. godine, čiji je cilj bio ispitati korisnike ADAS sustava o načinu korištenja i razumijevanju njihovog funkcioniranja, pokazali su da je samo 21 % vlasnika automobila sa sustavom za nadzor mrtvog kuta uvidjelo da sustav ne može primijetiti vozilo koje prolazi velikom brzinom, dok 33 % vozača sa sustavom automatskog kočenja nije znalo da prljavština, snijeg ili led utječe na rad senzora kamere. Nadalje, istraživanje je pokazalo da su vozači skloni

prilagođavanju potencijalno nesigurnom ponašanju pri korištenju sustava. Drugim riječima, 29 % ispitanika prijavilo je da obavljaju druge aktivnosti prilikom korištenja sustava prilagodljivog tempomata, dok je 30 % vlasnika automobila sa sustavom za nadzor mrtvog kuta prijavilo kako ponekad promjene traku bez da oni sami vizualno provjere mrtvi kut [24].

Osim što su prisutni rizici vozačeva razumijevanja sustava, postoje i rizici koji su povezani sa samim radom ADAS sustava. Pri plasiranju nove tehnologije na tržište može doći do pogreška u radu sustava iz razloga što je sama tehnologija još uvijek u razvoju. Drugim riječima, korištenjem značajki određenog sustava u stvarnom okruženju spoznaje se da automatizacija još uvijek ne može pokriti sve moguće situacije u vožnji i prometu. Takvo stanje može se tumačiti kao „nezrelost“ sustava, odnosno „dječje bolesti“ sustava. Primjerice, sustav može pogrešno procijeniti što se događa u njegovoj okolini i ponašati se nepredvidljivo poduzimajući nelogične postupke. Pogreške nastaju zbog složenosti funkcioniranja sustava koji čini velika količina hardvera i softvera u vozilu. Sustavi prikupljaju informacije iz okoline uz pomoć senzora i podaci se procesuiraju pomoću računalnog sustava u vozilu koristeći algoritme koji asistiraju vozaču tijekom vožnje (npr. aktiviranje kočnice ili upozoravanje). Posebno je ugrožena ispravnost rada senzora pri nepovoljnim vremenskim uvjetima ili uvjetima smanjene vidljivosti na prometnici. Osim toga, softverski kodovi mogu sadržavati određene greške, a ako su one otkrivene nakon stavljanja na tržište, mogu negativno utjecati na funkcioniranje sustava [29].

U nastavku su dana dva primjera prometnih nesreća s nizozemskih prometnica u kojima su sudjelovala vozila s ADAS sustavima. Prvi je primjer prometna nesreća iz 2016. godine u kojoj je sudjelovao Volvo tegljač koji se pri brzini od 83 km/h zabio u stražnji dio vozila ispred sebe. Tegljač je imao sustav automatskog kočenja koji nije zakočio, kao niti vozač. Nesreća se dogodila jer je vozilo u koje se zabio tegljač bila poluprikolica natovarena buldožerom. Takva konfiguracija stražnjeg dijela vozila nije bila poznata „machine-vision“ sustavu te samo vozilo nije detektirano [24].

Drugi je slučaj nesreća u kojoj je sudjelovao Teslin Model S koji se kretao lijevom prometnom trakom autoceste brzinom od 150 km/h s upaljenim autopilotom (kombinacija prilagodljivog tempomata i sustava za održavanje vozila unutar kolničke trake). U desnoj traci kretala se kolona teretnih vozila. Jedno od tih vozila skrenulo je u lijevu traku te se Tesla vozilo zabilo u stražnji dio (sustav nije na vrijeme detektirao kamion i zakočio). Razlog kašnjenja detekcije je taj što tadašnji sustav iz 2014. godine nije mogao primijetiti vozilo koje mijenja prometnu traku, nego je bio ograničen na vozila koja se kreću ravno ispred njega. Daljnja

istraživanja i testiranja provedena na deset marki automobila pokazala su da je sustav prilagodljivog tempomata imao poteškoća pri detektiranua vozila koja se „ulijevaju“ ili „izlijevaju“ iz prometnog toka jer se stražnji dio vozila pri navedenim radnjama nalazi pod određenim kutom. Osim toga, kombinacije određenih sustava kao što su prilagodljiv tempomat, sustav za održavanje vozila unutar kolničke trake i sustav automatskog kočenja služe isključivo za korištenje na cestama s jasno definiranim prometnim trakama kao što su autoceste. Pri prelasku s takvih cesta na ceste niže kategorije njihova funkcionalnost se gubi, stoga bi sustavi trebali dati informaciju vozaču da on preuzima vožnju [24].

Značajan problem predstavlja i potencijalni rizik od kibernetičkih napada i problem zaštite podataka. Naime, vozila opremljena ADAS sustavima imaju više vanjskih veza komunikacije i digitalnih ulaza koje treba zaštititi od zlouporabe. S obzirom na to da ADAS uspostavlja izravnu vezu između računalnih sustava vozila i njegovih kontrolnih mehanizama, u teoriji svatko tko ima digitalni pristup ADAS-u može kontrolirati vozilo na daljinu. Američki su znanstvenici 2014. godine demonstrirali kibernetički napad na računalo dvaju vozila (Jeep Cherokee i Toyota Prius) pa su pri napadu kontrolirali veliki broj ADAS sustava. Trenutno nema zabilježenih slučajeva kibernetičkih napada, ali vozila i proizvođački podatkovni centri ne pohranjuju dovoljno informacija na temelju kojih bi zaključili da je razlog prometne nesreće kibernetički napad na vozilo. Također, u automobilskoj industriji nije uobičajeno objavljivati informacije o nedostacima vezanim uz kibernetičku sigurnost jer se pretpostavlja da bi transparentnost na ovom području mogla dovesti do više sigurnosnih problema [24].

3. SUSTAVI PREPOZNAVANJA OZNAKA NA KOLNIKU

Prometne nesreće uzrokovane napuštanjem prometne trake predstavljaju jednu od najčešćih vrsta nesreća. Samo u SAD-u 51 % nesreća sa smrtnim posljedicama uzrokovano je napuštanjem trake tj. prelaskom vozila preko rubne ili središnje linije [7]. Slična je situacija i u RH gdje je u razdoblju od 2010. do 2018. godine zabilježeno 7 438 prometnih nesreća s poginulim i/ili teže ozlijeđenim osobama uzrokovanih slijetanjem vozila s ceste [6]. Stoga, sustav koji bi mogao dati upozorenje vozačima da napuštaju prometnu traku ima veliki potencijal za spašavanje velikog broja ljudskih života.

LKS (engl. *Lane Keeping System*) ili LKA (engl. *Lane Keeping Assistance*) sustav za zadržavanje vozila u prometnoj traci i LCA (engl. *Lane Change Assistant*) ili LDW (engl. *Lane Departure Warning*) sustav za pomoć pri promjeni trake sustavi su dizajnirani za pomoć vozača pri održavanju lateralnog položaja vozila [19]. Zbog značajnog potencijala za smanjenje prometnih nesreća, naročito onih uzrokovanih izlijetanjem vozila s kolnika ili prelaskom u drugu prometnu traku, navedeni su sustavi zadnje desetljeće predmet niza znanstvenih i stručnih istraživanja. Dio tih istraživanja usmjeren je na utvrđivanje potencijala navedenih sustava u smanjenju prometnih nesreća. Ovisno o stupnju implementacije, tipu vozila i podacima o nesrećama, procjenjuje se da LKS može spriječiti između 6 % i 23 % nesreća sa smrtnim posljedicama [30, 31, 32, 33].

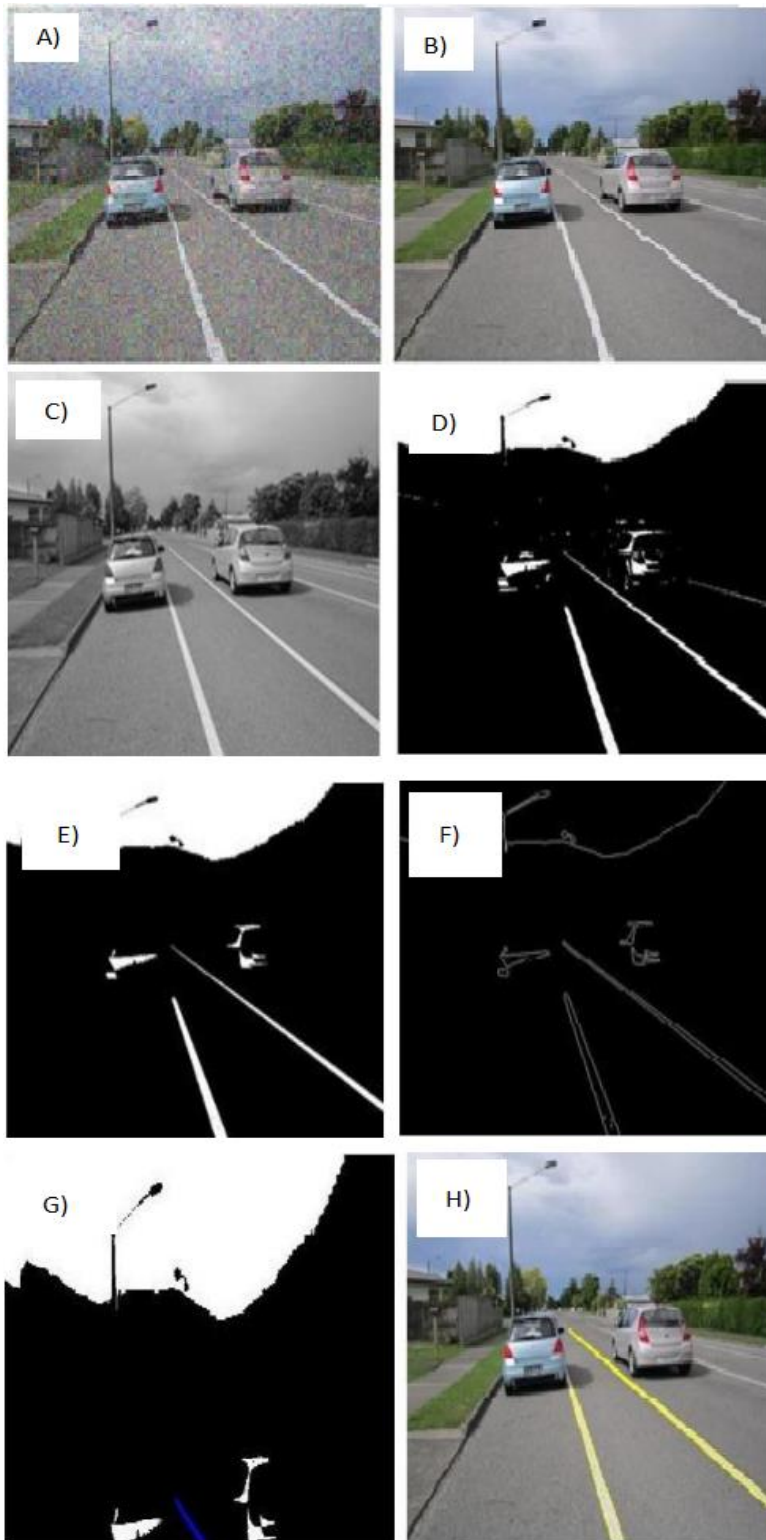
S druge strane, dio studija evaluirao je učinkovitost navedenih sustava na temelju podataka dobivenih iz „stvarnog“ prometa. Prvo takvo istraživanje istraživalo je primjenu navedenog sustava u teretnim vozilima. Ukupno gledano rezultati su pokazali da su kamioni opremljeni sustavom prepoznavanja oznaka imali 48 % nižu stopu sudara za relevantne sudare (slijetanje jednog vozila s ceste, frontalnog i bočnog sudara) u usporedbi s kamionom bez navedenog sustava [34]. Analiza švedske nacionalne statistike prometnih nesreća pokazala je da je primjena sustava prepoznavanja oznaka utjecala na smanjenje prometnih nesreća za 53 % (s nižom granicom od 11 %) za frontalne sudare i sudare s jednim vozilom na cestama s višim ograničenjima brzine (70 – 120 km/h) [8]. Slično je zaključeno i u dvjema studijama iz 2018. godine. Spicer i dr. [35] temeljili su svoje istraživanje na prometnim nesrećama u kojima su sudjelovala vozila marke BMW te je utvrđeno da su vozila opremljena sustavom prepoznavanja oznaka i automatskom kriznom kočnicom bila uključena u između 13 i 63 % manje prometnih nesreća (ovisno o tipu vozila i vrsti nesreća). Nadalje, Cocchino [36] je zaključio da su, ne računajući demografiju vozača, vozila sa sustavom prepoznavanja oznaka imala znatno niže stope nesreća svih posljedica (18 %), kao i nesreća s ozlijeđenim osobama (24 %) i nesreća sa

smrtnim posljedicama (86 %). Međutim, autor ističe da je učinak navedenog sustava manji kada se kao kontrolna varijabla uključi demografija vozača. U tom slučaju smanjenje svih nesreća iznosilo je oko 11 %, dok je smanjenje nesreća s ozlijeđenima i smrtno stradalima iznosilo oko 21 %.

3.1. Princip rada

Primjene sustava za detekciju oznaka na kolniku mogu biti jednostavne poput ukazivanja položaja traka vozaču na vanjskom zaslonu do složenijih zadataka poput predviđanja promjene trake u trenutnoj budućnosti kako bi se izbjegli sudari s drugim vozilima. Neka od sučelja koja se koriste za otkrivanje traka uključuju kamere, lasere, lidare i GPS uređaje [37].

Pojednostavljeno detekcija oznaka na kolniku započinje prethodnom obradom slike koja uključuje različite korekcije prikupljene slike (npr. korekcija ekspozicije, uklanjanje sjene) i izdvajanje pojedinih značajki. Nadalje, slijedi otkrivanje značajki i uklapanje modela, a zatim integracija vremena kako bi se zadržala konzistentnost vremena i položaja [37]. Na slici 9. prikazan je proces detekcije oznaka na kolniku. Slika a) prikazuje ulaznu sliku, dok slika b) predstavlja filtriranu verziju ulazne slike. Na slici c) filtrirana slika pretvara se u sive sjene radi smanjenja vremena obrade, nakon čega se slika segmentira u binarnu sliku (slika d) kako bi se omogućilo lociranje oznake na snimljenoj slici. Slika e) predstavlja izgladenu sliku, a slika f) prikazuje otkrivene rubove na slici uz pomoć detektora rubova. Slika g) prikazuje izgladenu sliku i na kraju je izlazna slika predstavljena na slici h) [37].



Slika 9. A) Ulazna slika; B) Filtrirana slika; C) Slika u sivim tonovima; D) Binarna slika; E) Izgladljena slika; F) Slika prepoznatih rubova; G) Izgladljena slika; H) Izlazna slika

Izvor [37]

3.2. Ograničenja i problemi u radu

Pravilna funkcija sustava potpore bočnog položaja vozila (LSS) ovisi o nekoliko čimbenika: kvaliteti kamere, stanju, boji, širini i vidljivosti oznaka na kolniku (dnevna vidljivost, noćna vidljivost – retrorefleksija i kontrast s kolnikom), konfiguraciji oznaka na kolniku (puna/isprekidana linija, duljina isprekidanih linija), brzini vožnje, vremenskim uvjetima, općoj vidljivosti okoliša, smjeru sunca, karakteristikama kolnika (vrsta, stanje i tekstura), geometriji ceste i vrsti ruba ceste (strukturirani/kombinacija) [8, 9, 11].

Sustav upozorenja na napuštanje trake (LDW) i sustav za pomoć pri promjeni trake (LKA) ovise o prisutnosti i vidljivosti uzdužnih oznaka na kolniku, stoga ne mogu funkcionirati kada su senzori blokirani ili prljavi ili kada su oznake traka odsutne, degradirane ili zaklonjene kišom, snijegom, prljavštinom itd. [19]. Različiti izazovi poput parkiranih i pokretnih vozila, loše horizontalne signalizacije, sjene stabla, zgrade i ostalih vozila, spojene prometne trake, natpisi i ostale oznake na cestama i neobični kolnički materijali uzrokuju probleme u otkrivanju traka [37]. Nadalje, navedeni sustavi mogu imati probleme u oštrim zavojima malih radijusa ili na područjima sa složenom geometrijom prometnica.

4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

U svrhu povećanja sigurnosti na cestama pomoću sustava za održavanje vozila unutar kolničke trake (LKS) provedeno je nekoliko istraživanja s ciljem ispitivanja funkcioniranja „machine-vision“ sustava u različitim uvjetima.

Jedno od prvih ispitivanja takve vrste provedeno je 2007. godine, a cilj istraživanja bio je analizirati učinkovitost sustava za upozoravanje pri napuštanju prometne trake koji je zasnovan na prepoznavanju slike [38]. Stopa djelotvornosti definirana je kao omjer broja slučajeva u kojima je uređaj za upozoravanje na napuštanje prometne trake mogao aktivirati alarme koji upozoravaju vozače na prelazak preko oznaka u svim slučajevima u kojima vozilo prelazi preko oznaka. Osim stope djelotvornosti autori su promatrali i broj lažnih alarma tj. broj svih slučajeva po milji udaljenosti u kojima testno vozilo nije prešlo preko oznake, a sustav upozoravanja se aktivirao. Cesta koja je odabrana za istraživanje nalazi se u Floridi, a odabrana je na temelju činjenice da sadrži oznake različitih kvaliteta i vrsta. Starost oznaka kreće se od 1 godine do više od 4 godine, a retrorefleksija oznaka nalazi se u rasponu od 100 mcd/lx/m² do više od 500 mcd/lx/m². Testno vozilo s instaliranim AutoVue sustavom vozilo se testnom dionicom tijekom različitih vremenskih uvjeta u oba smjera vožnje. Rezultati ukazuju na činjenicu da u većini slučajeva stopa učinkovitosti u suhim uvjetima i uvjetima lagane kiše iznosi 100 %. Međutim, na stopu učinkovitosti značajno je utjecala jaka kiša u noćnom periodu. Štoviše, tijekom noćnih uvjeta i s jakom kišom promatrane vrijednosti stope učinkovitosti kretale su se između 0 % i 30 %. U uvjetima sumraka stopa djelotvornosti smanjila se za 15 % do 18 %. Na temelju rezultata autori su zaključili da treba povećati vidljivost oznaka u noćnim i kišnim uvjetima. Predložena je uporaba retroreflektivnih materijala (staklenih mikrokuglica) različitih veličina za postizanje bolje vidljivosti i odvodnje. Također, naglašava se prednost profiliranih oznaka radi njihove trajnosti i odlične odvodnje vode s površine oznaka.

Švedska studija iz 2010. godine testirala je razne vrste oznaka na kolniku (profilirane, neprofilirane, nove i istrošene oznake) u različitim vremenskim uvjetima kako bi se ocijenila njihova mjerljivost pomoću „machine-vision“ sustava [39]. U studiji je zaključeno da u suhim dnevnim uvjetima retrorefleksija mora biti najmanje 5 mcd/lx/m² veća od površine kolnika i da mora iznositi najmanje 85 mcd/lx/m². Tijekom noćnih uvjeta i kada je kolnik mokar, minimalna vrijednost retrorefleksije trebala bi biti 20 mcd/lx/m². Nadalje, rezultati istraživanja naglašavaju važnost uporabe profiliranih oznaka i ističu kako ceste šire od 7 metara trebaju imati središnju liniju kako bi se sustav prepoznavanja oznaka aktivirao.

Cestovna je federacija Europske unije (ERF) u 2011. godini objavila savjetodavni dokument u kojem su navedeni minimalni standardi koje moraju zadovoljavati oznake na kolniku u različitim uvjetima [40]. ERF predlaže sustav „150 * 150“ što znači da minimalna noćna vrijednost retrorefleksije u suhim uvjetima mora biti 150 mcd/lx/m², a minimalna širina oznaka na kolniku na svim cestama treba biti 150 mm. Minimalna vrijednost retrorefleksije u noćnim i mokrim uvjetima mora iznositi 35 mcd/lx/m².

Mobileye je 2018. godine kao globalni voditelj tržišta senzora za kamere iznio sažetak izazova pri označavanju cesta s pratećim preporukama. Ključne preporuke za 2019. godinu navedene su u izvješću Američke udruge sigurnosti u prometu (ATSSA), a to su:

- širina oznaka trebala bi biti od 12 do 15 cm i ne smije biti veća od 25 cm,
- duljina oznake treba biti standardizirana, po mogućnosti oko 4,5 metara dugačka s razmakom od 7,6 metara,
- oznake treba pravovremeno i pravilno održavati,
- stare oznake treba pravilno ukloniti s kolnika,
- u područjima s čestim kišnim razdobljima potrebna je veća razina retrorefleksije,
- standardizirana širina poprečnih „STOP“ oznaka treba biti 35-50 cm.

Jedno od prvih opsežnih istraživanja s ciljem ispitivanja utjecaja uzdužne oznake bijele ili žute boje na detekciju pomoću „machine-vision“ sustava u vozilu provedeno je u Texasu [41]. Korištena su dva vozila opremljena Mobileye 5 kamerama, dok su za mjerenje retrorefleksije tj. dnevne i noćne vidljivosti korišteni ručni retroreflektometri (Delta LZL-XL Mark II i Celta LTL-XL). Ocjena pouzdanosti detekcije predstavljala je cjelobrojnu vrijednost između 0 i 3 pri čemu je 3 najviša razina pouzdanosti detekcije. Za sustave koji upozoravaju na napuštanje prometne trake potrebna je vrijednost pouzdanosti od 2 ili 3.

Istraživanje je podijeljeno na dvije faze. Tijekom faze 1 (2016.) korišteno je 14 različitih cestovnih oznaka. Svaka oznaka posebno je proizvedena za navedeno istraživanje kako bi na taj način obuhvatila širok raspon kvalitete oznaka na kolniku. U drugoj fazi (2017.) ispitano je sedam testnih dionica koje su sadržavale 11 različitih oznaka. Jedan par oznaka ne sadrži staklene mikrokuglice, dok drugi par sadrži mikrokuglice različitih veličina i crni abrazivni materijal koji osigurava promjenu boje u skladu s Američkim standardom (AASHTO).

Stvoreno je osam scenarija, a svaki je predstavljao različite uvjete osvjetljenja i različite vremenske uvjete. U mokrim uvjetima tijekom dana na rezultate je utjecala prisutnost sunca koje je izazivalo bljesak na oznakama i na samom kolniku čime se pouzdanost detekcije

smanjuje. Sve oznake s razinom retrorefleksije od 53 mcd/lx/m² ili višom postigle su ocjenu pouzdanosti 2 ili više. Potrebno je napomenuti da je u mokrim uvjetima ispitivanje provedeno nakon kiše, a ne tijekom padanja kiše (prema normi ASTM E2177). Nadalje, pune oznake lakše su detektirane za razliku od isprekidanih oznaka, a razlika između spomenutih vrsta oznaka najviše je primijećena tijekom dana. Pri povećanju brzine smanjuje se detekcija oznaka tijekom dana, dok, s druge strane, tijekom noći brzina uglavnom nije utjecala na detekciju oznaka. Štoviše, u nekim je slučajevima zabilježeno i blago poboljšanje detekcije s povećanjem brzine. Osim toga ispitivanje je ukazalo da okolna rasvjeta ima negativan utjecaj na ocjenu pouzdanosti detekcije. Autori su naglasili da je potreba za pravilnim održavanjem izuzetno bitna za sustave koji detektiraju oznake. Također, zaključeno je da sustavi za detekciju oznaka vide slično kao i čovjek, što znači da ako će čovjek dobro vidjeti oznaku da će i sustav za detekciju prepoznati oznaku na kolniku.

Sveobuhvatnu studiju proveo je i institut Austroads u Australiji [42]. Studija je imala definirana dva glavna cilja istraživanja: 1) istražiti kako najbolje konfigurirati i održati uzdužne oznake i projektirati oznake kako bi se osigurala najveća moguća uporabna svojstva i 2) utvrditi optimalnu razinu održavanja potrebnu za održavanje funkcija vođenja s omogućenim „machine-vision“ sustavom.

Sam projekt podijeljen je na četiri dijela. U prvom djelu proveden je opsežan pregled literature, dok se drugi dio sastojao od razgovora s relevantnim institucijama i stručnjacima. Treći dio predstavlja test ispitivanja koja su djelomično provedena na testnom polju, a djelomično na cesti u stvarnim prometnim uvjetima. U sklopu navedenih ispitivanja definirano je nekoliko ispitnih slučajeva te su utvrđeni ključni parametri za analizu (vidljivost oznaka danju i noću, širina oznake, širina kolnika, vremenski uvjeti, stanje kolnika, konfiguracija uzdužnih oznaka i raskrižja te brzina vožnje). Ukupno je korišteno sedam vozila s ugrađenim različitim naprednim sustavima pomoći vozaču, dok je jedno vozilo bilo opremljeno Mobileye kamerom i služilo je kao referentno vozilo. Pomoću Delta LTL-M dinamičkog retroreflektometra i Zehnter ZRM 6014 ručnog retroreflektometra mjerena je vrijednost retrorefleksije oznaka na kolniku. U posljednjem dijelu projekta napravljena je procjena troškova i koristi predloženih mjera.

Na temelju navedene metodologije zaključeno je sljedeće:

- omjer kontrasta između oznaka i podloge tijekom dnevnih uvjeta mora biti minimalno 3 – 1,

- omjer kontrasta za noćnu vidljivost između oznaka i podloge mora biti između 10 – 1 za asfaltne kolnike i 5 – 1 za betonske kolnike,
- općenito minimalna razina retrorefleksije oznaka za noćnu vidljivost mora biti 100 mcd/lx/m².
- kiša smanjuje detekciju oznaka za 32 %,
- uz minimalnu rasvjetu kontrastni omjer može se poboljšati, no uz prekomjernu rasvjetu može doći do efekta „svjetlosnog cvijeta“,
- optimalna širina rubnih oznaka je 150 mm, a isprekidanih oznaka 100 m,
- korištenje jasnih linija s obje strane kolnika, bez praznina i dosljedne širine prometne trake, pogoduje boljoj detekciji oznaka.

5. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju opisana je sva istraživačka oprema koja je korištena. Korišteni su dinamički retroreflektometar i Mobileye kamera. Nakon toga navedene su i opisane testne dionice i procedure ispitivanja.

5.1. Istraživačka oprema

a) Dinamički retroreflektometar

Dinamički retroreflektometar koristi se pri ispitivanju noćne vidljivosti, odnosno retrorefleksije oznaka na kolniku. Navedeni uređaj postavlja se na mjereno vozilo s bočne strane i na taj način omogućuje konstantno mjerenje noćne vidljivosti oznaka na kolniku tijekom vožnje vozila brzinom do 120 km/h [43]. U ovom istraživanju korišten je mjerni uređaj tvrtke Zehntner (ZDR 6020) postavljen na mjereno vozilo Zavoda za prometnu signalizaciju Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu (Slika 10.). Prije početka mjerenja mjerni je uređaj kalibriran u skladu s postupkom kalibracije koju je propisao proizvođač. Mjerni interval namješten je na 50 m, što znači da uređaj svakih 50 m računa prosječnu vrijednost retrorefleksije unutar odgovarajućeg intervala i pohrani navedenu vrijednost pohrani.



Slika 10. Mjerno vozilo s montiranim uređajem ZDR 6020

Izvor: [43]

b) Mobileye kamera

Mobileye je globalni lider u razvoju tehnologije vida za napredne sustave za pomoć vozaču (ADAS) i autonomnu vožnju. Naime, više od 27 proizvođača automobila koristi određene tehnologije tvrtke Mobileye za svoje tehnologije upravljanja vozilima [44]. U ovom istraživanju korištena je Mobileye 360 kamera instalirana u testno vozilo Sveučilišta u Grazu

(Slika 11.). Koristeći čip za obradu slika, navedena kamera omogućava kvalitetnu obradu slika u realnom vremenu različitih objekata na cestama kao što su oznake na kolniku, pješaci, ostala vozila i sl.



Slika 11. Mobileye kamera (lijevo) i testno vozilo Sveučilišta u Grazu

Izvor: [45]

Za potrebe istraživanja zabilježeni su podatci povezani s tipom uzdužnih oznaka na kolniku (pune/isprekidane), približnom širinom oznaka, dometom vidljivosti i kvaliteti detekcije središnjih i rubnih linija. Tehničke specifikacije Mobileye sustava vidljive su u tablici 1.

Tablica 1. Tehničke specifikacije Mobileye sustava

Vidni senzor	
Optički senzor	Aptina MT9V024 (1/3) RCC
Oblik polja	Ukupno: 752 H x 480 V – aktivni pikseli: 640 H x 480 V
Veličina piksela	6,0 μm x 6,0 μm
Dinamički raspon	> 55 dB linearno; > 100 dB u HDR režimu
Odaziv	4,8 V/lux sek (550 nm)
Kut gledanja	38 ° (vodoravno)
Raspon fokusa	5 m do beskonačnosti
AGC	Automatska kontrola senzora slike za visoki dinamički raspon
Procesor vida za EyeQ2	
Brzina sata 332 MHz u sedam paralelnih procesa	
Dvije MIPS24KF 32 bitni CPU	
Osam 64 – bitnih uređaja za računanje vida (VCE)	
Osam kanala DMA	
64 – bitna širina 512 KB on - chip SRAM	

Izvor: [46]

Testno vozilo također je opremljeno preciznim mjernim uređajem za zabilježavanje putanje kretanja vozila kombinacijom GPS lokalizacije (Novatel OEM-6-RT2 prijemnik) i inercijalne mjerne jedinice (GENESYS ADMA G-III).

5.2. Testne dionice i procedure ispitivanja

Istraživanje je provedeno na četiri dionice cesta u Zagrebačkoj i Sisačko-moslavačkoj županiji u Republici Hrvatskoj, a ukupna duljina iznosi 120,8 km. Odabrane testne dionice većim dijelom prolaze kroz ruralna područja i djelomično kroz naselja. Nadalje, dionice predstavljaju dvosmjernu cestu sa širinom jedne prometne trake od 3,5 m i malim prometnim opterećenjem. Sve oznake na kolniku bijele su boje, široke 15 cm i izrađene od boja na bazi otapala (Tip 1). Glavne karakteristike testnih sekcija vidljive su u tablici 2.

Tablica 2. Karakteristike testnih sekcija

	Duljina dionice (km)	Širina oznaka (cm)	Duljina središnje oznake (km)	Starost oznake	Duljina rubne oznake (km)
1	32,21	15	puna: 20,61 isprekidana: 11,60	središnja: < 6 mj. rubna: > 1 god.	puna: 11,73
2	20,53	15	puna: 14,68 isprekidana: 5,85	središnja: < 6 mj. rubna: > 1 god.	puna: 11,30
3	38,05	15	puna: 15,00 isprekidana: 23,05	središnja: < 6 mj. rubna: > 1 god.	puna: 22,27
4	30,01	15	puna: 30,08	središnja: > 1 god.	-

Istraživanje se sastoji od dva testa: 1) utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima i 2) usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta. U prvom su dijelu istraživanja mjerenja (dinamičkim retroreflektometrom i Mobileye kamerom) provedena tijekom jedne noći (21.9.2020.), dok je drugi dio istraživanja proveden u dva navrata, prvi put za vrijeme noćnih uvjeta (21.9.2020.), a drugi put u dnevnim uvjetima (22.9.2020.). Za vrijeme oba uvjeta mjerenja vrijeme je bilo vedro i bez oborina. Brzina vožnje tijekom mjerenja bila je u skladu s ograničenjima brzine, a kretala se između 60 km/h i 80 km/h.

6. ANALIZA PODATAKA

Podaci su analizirani na temelju provedenih mjerenja i dobivenih rezultata. U narednim poglavljima opisana je metodologija obrade i analize podataka ovisno o vrsti testiranja.

6.1. Test 1 – Utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima

Kao što je ranije navedeno, podaci dobiveni pomoću dinamičkog retroreflektometra snimljeni su s rasponom mjernog intervala od 50 m te predstavljaju prosječnu vrijednost retrorefleksije (noćne vidljivosti) unutar mjernog intervala. S ciljem jednostavnije obrade vrijednosti retrorefleksije kategorizirane su u četiri skupine: 1) $< 100 \text{ mcd/lx/m}^2$; 2) $\geq 100 \leq 200 \text{ mcd/lx/m}^2$; 3) $> 200 \leq 300 \text{ mcd/lx/m}^2$; 4) $> 300 \text{ mcd/lx/m}^2$. S druge strane, pomoću Mobileye kamere zabilježen je domet vidljivosti i kvaliteta detekcije oznaka na kolniku. Domet vidljivosti iskazan je u metrima (maksimalan iznosi 80 m), dok je razina kvalitete detekcije rangirana prema ljestvici od 0 do 3. Razina 0 predstavlja „ništa nije očitano“, 1 „niska pouzdanost očitavanja“, 2 „srednja pouzdanost očitavanja“ i 3 „visoka pouzdanost očitavanja“. Brzina kojom kamera prikuplja uzorke namještena je na 100 Hz.

Budući da je cilj prvog testa analizirati isključivo utjecaj retrorefleksije na detekciju oznaka na kolniku, manji dijelovi testnih dionica koje prolaze kroz naseljena područja isključeni su iz analize zato što na tim područjima postoji cestovna rasvjeta.

Korištenjem QGIS alata podaci su preklapljeni tj. vrijednosti retrorefleksije pridružene su podacima s Mobileye uređaja. Nakon toga za svaki interval od 50 m izračunate su prosječne vrijednosti kvalitete detekcije i dometa vidljivosti. Normalna raspodjela retrorefleksije (RL) i domet vidljivosti ispitani su pomoću Kolmogorov – Smirnovog testa, koji predstavlja statistički test koji se upotrebljava za ispitivanje hipoteze, uspoređujući kumulativnu raspodjelu podataka s očekivanom kumulativnom normalnom raspodjelom [47]. Za testiranje korelacije između retrorefleksije, dometa vidljivosti i kvalitete detekcije oznaka korišten je Spearmanov koeficijent korelacije koji predstavlja neparametarski test koji omogućuje ispitivanje korelacije između kategoričkih varijabli, što je u ovom istraživanju slučaj jer je kvaliteta detekcije podijeljena na 4 kategorije [48].

Nadalje, Kruskal – Wallinsov test korišten je za utvrđivanje statistički značajne razlike između a) dometa vidljivosti i definiranih kategorija retrorefleksije i b) prosječne retrorefleksije između pojedine kategorije kvalitete detekcije. Kruskal – Wallinsov test predstavlja test analize

varijance, samo umjesto brojčanih mjernih podataka koristi kategorije [49]. Daljnja analiza Kruskal – Wallinsovih testova rađena je nizom Mann – Whitneyevih takozvanih U testova s Bonferron korigiranom razinom statističke značajnosti. Mann-Whitneyev U test neparametarski je test primjenjiv na uzorke koji ne slijede normalnu distribuciju ili sadrže malo podataka [50]. U svim testovima značajna razina postavljena je na 5 %. Za statističku analizu korišten je IBM SPSS 26.

6.2. Test 2 – Usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta

Kao i kod prvog testa Mobileye kamerom prikupljeni su podaci vezani uz domet vidljivosti i kvalitetu detekcije oznaka na kolniku. Kvaliteta detekcije rangirana je, kao i u prethodnom testu, pomoću ljestvice od 0 do 3 (0 – „ništa nije očitano“, 1 – „niska pouzdanost očitavanja“, 2 – „srednja pouzdanost očitavanja“ i 3 – „visoka pouzdanost očitavanja“). Brzina prikupljanja uzoraka pomoću kamere namještena je na 100 Hz.

Rezultati mjerenja između dnevnih i noćnih uvjeta povezani su GPS koordinatama i provedene su dvije analize: 1) kvaliteta detekcije oznaka na kolniku i 2) domet vidljivosti. U prvoj analizi za svaku dionicu izračunat je broj uzoraka za svaku razinu kvalitete. Wilcoxonov rangirani test korišten je za testiranje razlike između broja razina kvalitete na svakoj dionici tijekom dana i noći. Općenito Wilcoxonov rangirani test neparametarski je test za usporedbu podataka s obzirom na to da je kvaliteta detekcija kategorička varijabla [51].

S druge strane, analiza dometa vidljivosti uključuje izračun apsolutnih prosjeka za svaku dionicu, oznaku i kategoriju kvalitete detekcije, kao i prosječnu razliku i standardnu devijaciju kada je dnevna kvaliteta detekcije oznaka bila veća u odnosu na noćne uvjete i obrnuto. Nadalje, t – test uparenih uzoraka korišten je za testiranje razlike između noćnih i dnevnih uvjeta za svaku oznaku na svakoj cesti. T-test statistički je postupak za određivanje statističke značajnosti razlike između dva uzorka tj. između dvije aritmetičke sredine [52]. Kao i u prvom testu značajna razina postavljena je na 5 %, a za analizu korišten je IBM SPSS 26.

7. REZULTATI

U skladu s provedenim analizama rezultati su razdvojeni prema testu koji je proveden. Kao što je ranije navedeno, prvim testom analizirao se utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćni uvjetima, dok drugi test uspoređuje kvalitetu detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta.

7.1. Test 1 – Utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima

Rezultati su podijeljeni u dva dijela: deskriptivna statistika i korelacijska analiza.

- a) Deskriptivna statistika – vrijednosti retrorefleksije, kvaliteta detekcije oznaka na kolniku i domet vidljivosti

Prosječna vrijednost retrorefleksije (R_L) kretala se od 0 do 661 mcd/lx/m² sa srednjom vrijednošću od 197,50 mcd/lx/m². Kolmogorov-Smirnov test ukazao je na značajno statističko odstupanje vrijednosti retrorefleksije od normalne raspodjele ($p < 0,001$). Iz navedenog razloga srednji i interkvartilni domet korišteni su kao dodatne mjere središnje tendencije i varijabilnosti. Srednja vrijednost retrorefleksije bila je 201 mcd/lx/m² s interkvartilnim rasponom od 109 do 290 mcd/lx/m².

Većina uzoraka (28,4 %) imala je retrorefleksiju između 200 i 300 mcd/lx/m², zatim je slijedila retrorefleksija između 100 i 200 mcd/lx/m² (27,0 %), dok je gotovo isti broj uzoraka imao retrorefleksiju ispod 100 mcd/lx/m² (22,6 %) ili više od 300 mcd/lx/m² (22,0 %). Nadalje, više od polovice mjerenja imalo je najvišu (3) kvalitetu detekcije (63,1 %), 20 % je imalo razinu 2, dok su razine 1 i 0 imale manje od 10 %.

Prosječni domet vidljivosti na kojem je Mobileye uspio detektirati oznake na kolniku kretao se od 0 do 74,89 m, a njegova srednja vrijednost bila je 37,79 m. I u ovom slučaju promatrana varijabla nije normalno distribuirana što je dokazano Kolmogorov-Smirnovljevom testom ($p < 0,001$). Medijan vrijednosti prosječnog vidnog polja bio je 40,28 m, a interkvartilni raspon od 25,45 do 52,0 m. Navedeni podaci prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Sažetak deskriptivne/opisne statistike

Prosječna R_L (mcd/lx/m ²)	n	(%)	Daljina pogleda (m)	
			Medijan	Interkvartilni raspon
< 100 mcd/lx/m ²	486	(22,6)	22,41	0,96 – 38,14
≥ 100 ≤ 200 mcd/lx/m ²	581	(27,0)	44,47	31,68 – 54,97
> 200 ≤ 300 mcd/lx/m ²	610	(28,4)	42,68	29,00 – 54,67
≥ 300 mcd/lx/m ²	473	(22,0)	42,94	32,69 – 52,73
Prosječna kvaliteta detekcije				
0	168	(7,8)	0,0	0,0 – 122,0
1	198	(9,2)	0,0	0,0 – 122,0
2	428	(19,9)	143,5	81,0 – 238,0
3	1356	(63,1)	243	172,0 – 314,5

b) Korelacijska analiza

Zbog odstupanja od normalne distribucije prosječne retrorefleksije i prosječnog dometa vidljivosti, kao i zbog činjenice da je prosječna kvaliteta detekcije kategorička varijabla, korišten je Spearmanov koeficijent korelacije kao mjera povezanosti prethodno spomenutih varijabli. Prosječna kvaliteta detekcije i prosječni domet vidljivosti pozitivno su korelirani s prosječnom retrorefleksijom, ali je prosječna kvaliteta detekcije jače povezana s prosječnom retrorefleksijom u odnosu na prosječni domet vidljivosti (Tablica 4.).

Tablica 4. Spearmanovi koeficijenti korelacije između ispitivanih varijabli

	1	2	3
1. Prosječna R_L	-		
2. Prosječna kvaliteta detekcije	0,53	-	
3. Prosječna daljina pogleda	0,29	0,52	-
Svi su koeficijenti značajni na razini $p < 0,001$			

Kruskal-Wallisov test pokazao je da postoji statistički značajna razlika u prosječnom dometu vidljivosti između kategorija prosječne retrorefleksije R_L ($p < 0,001$). Iz navedenog razloga kategorije su dodatno uspoređene pomoću serije Mann-Whitneyevih U testova s Bonferronijevom korekcijom. Prosječni opseg vidljivosti bio je značajno niži ($p < 0,001$) za prvu kategoriju retrorefleksije u rasponu od 0 do 99 mcd/lx/m² u odnosu na sve ostale kategorije retrorefleksije (od 100 do 199 mcd/lx/m², od 200 do 299 mcd/lx/m² i > 300 mcd/lx/m²). Druga kategorija retrorefleksije (u rasponu od 100 do 199 mcd/lx/m²) nije se značajno razlikovala u prosječnom dometu vidljivosti u odnosu na treću kategoriju u rasponu od 200 do 300 mcd/lx/m²

($p = 0,594$) niti u usporedbi s četvrtom kategorijom od 300 mcd/lx/m^2 i višom retrorefletivnosti ($p > 0,999$). Statistički značajna razlika između treće i četvrte kategorije retrorefleksije također nije utvrđena ($p > 0,999$). Sažetak prethodno opisanih rezultata prikazan je u tablici 5.

Tablica 5. Sažetak razlike u prosječnom rasponu pogleda između kategorija prosječne retrorefleksije

Kategorije retrorefleksije (mcd/lx/m^2)	1	2	3
1 ($< 100 \text{ mcd/lx/m}^2$)	-		
2 ($\geq 100 \leq 200 \text{ mcd/lx/m}^2$)	$p < 0,001$	-	
3 ($> 200 \leq 300 \text{ mcd/lx/m}^2$)	$p < 0,001$	$p = 0,594$	-
4 ($\geq 300 \text{ mcd/lx/m}^2$)	$p < 0,001$	$p > 0,999$	$p > 0,999$

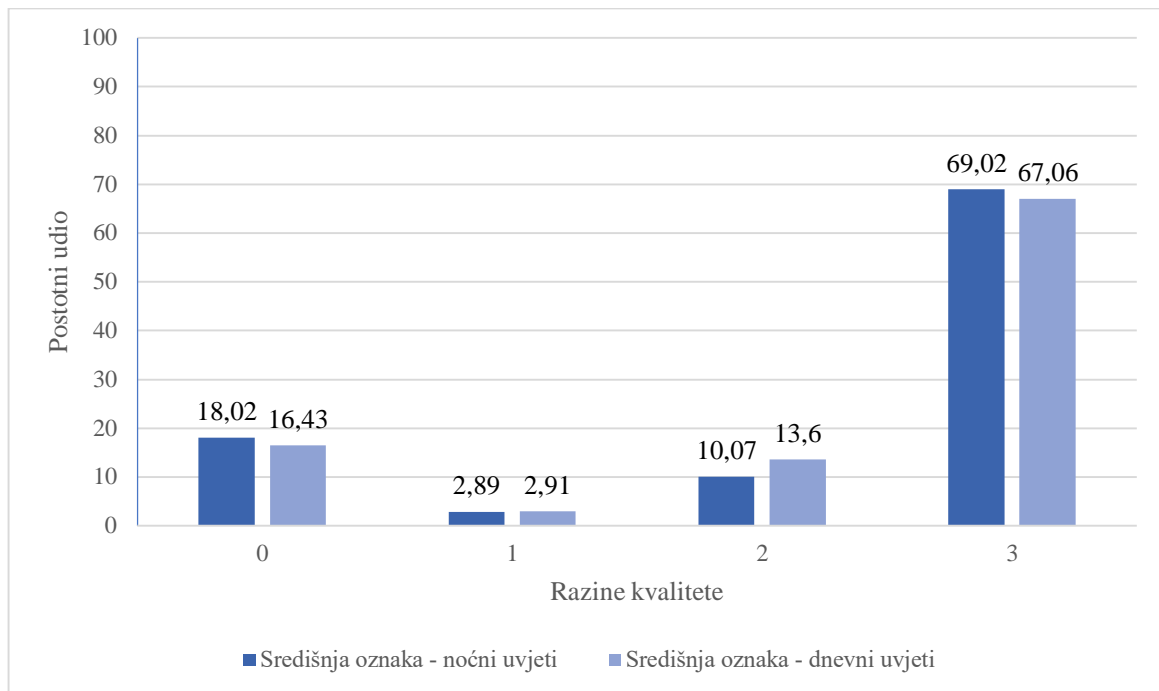
Analizirajući razlike u prosječnoj retrorefleksiji između kategorija kvalitete detekcije oznaka, rezultati Kruskal-Wallisova testa pokazuju da postoji statistička značajna razlika ($p < 0,001$). Kao i u prethodnom slučaju za detaljniju analizu korišten je Mann-Whitney U test s Bonferronijevom korekcijom. U slučajevima kada je kvaliteta detekcije bila 0 (ništa nije očitano) ili 1 (niska pouzdanost otkrivanja), prosječna retrorefleksija bila je znatno niža u odnosu na slučaj kada je kvaliteta detekcije bila 2 (srednja pouzdanost otkrivanja, $p < 0,001$) ili 3 (visoka pouzdanost otkrivanja, $p < 0,001$). Također, prosječna retrorefleksija u slučajevima najviše kvalitete detekcije (3) bila je značajno veća u odnosu na slučajeve kada je kvaliteta detekcije bila 2 ($p < 0,001$).

7.2. Test 2 – Usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta

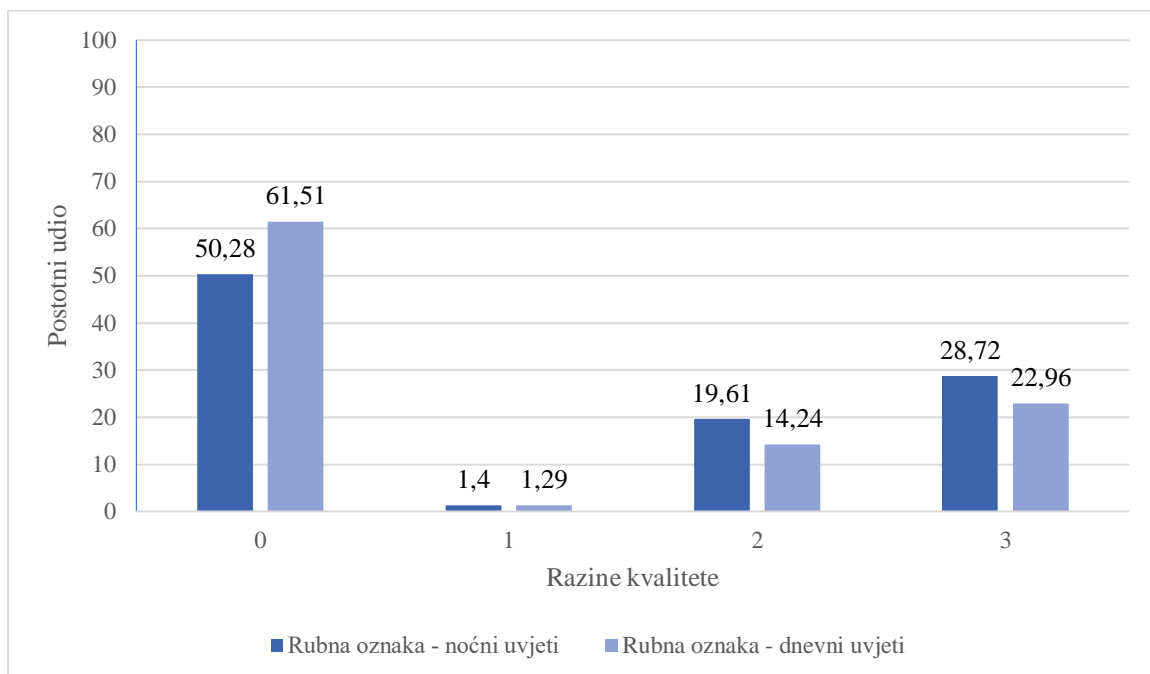
Tijekom noćnih uvjeta 69 % svih očitavanja središnje oznake rangirano je kao razina 3 (visoka pouzdanost otkrivanja). Razinu 0, koja predstavlja „ništa nije očitano“, prikazalo je oko 18 % središnjih oznaka, dok je 10 % imalo „srednju pouzdanost otkrivanja“ (razina 2). Gotovo 2 % središnjih oznaka imalo je „nisku pouzdanost otkrivanja“ (razina 1). Slični rezultati dobiveni su i za rubne oznake: 67 % rubnih oznaka rangirano je kao razina 3, 13,6 % razina 2, gotovo 3 % razina 1, dok je neočitanih oznaka (razina 0) 16,4 %.

Uzevši u obzir ukupne rezultate za središnje linije u dnevnim uvjetima, vidljive su promjene u određenim slučajevima. Naime, broj uzoraka klasificiranih kao razina 3 i 0 smanjen je u odnosu na noćne uvjete za oko 2 %. Broj uzoraka razvrstanih u razinu 1 ostao je gotovo

isti kao i u noćnim uvjetima, dok se razina 2 povećala za 3,5 %. U slučaju rubnih linija zabilježeno je smanjenje razine detekcije 2 i 3 za oko 5 %, razina 1 ostala je približno ista, dok se razina 0 povećala za 11 %. Navedeni rezultati prikazani su na grafikonima 1 i 2.

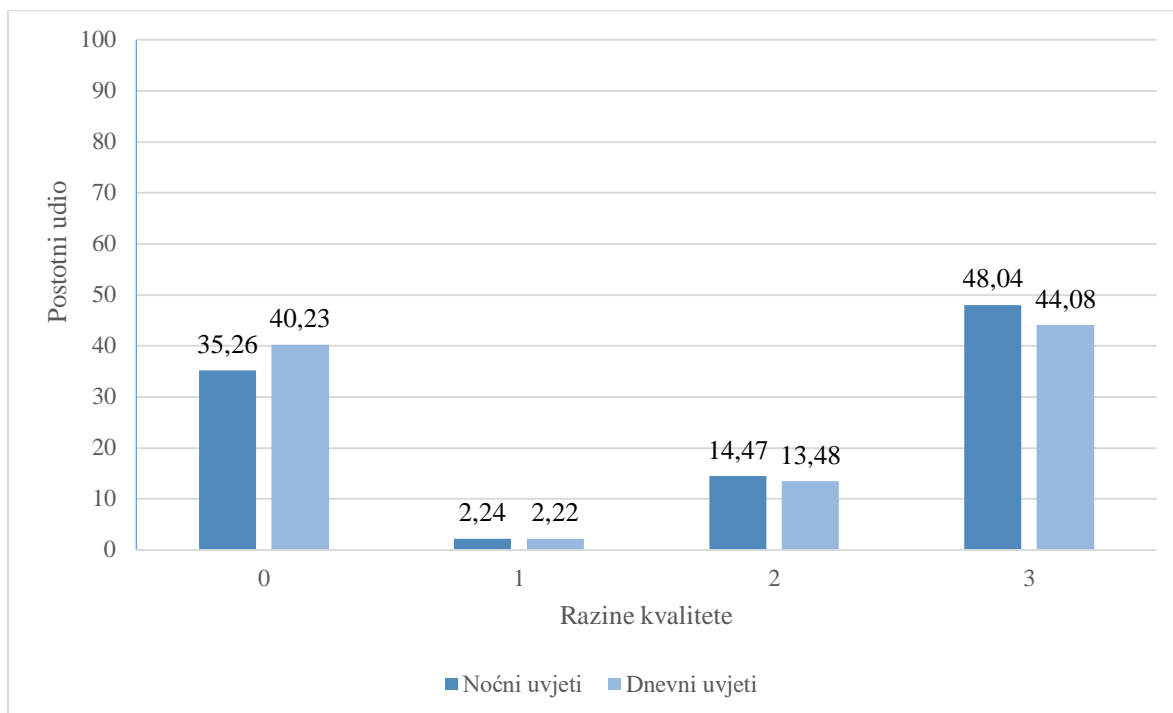


Grafikon 1. Usporedba očitavanja Mobileye sustava (razina kvalitete) između mjerenja kvalitete noću i danju za središnju oznaku



Grafikon 2. Usporedba očitavanja Mobileye sustava (razina kvalitete) između mjerenja kvalitete noću i danju za središnju i rubnu oznaku

Analizirajući sve ceste i oznake zajedno, u prosjeku 44 % očitavanja tijekom dnevnih uvjeta klasificirano je kao razina 3, 40 % očitavanja kao razina 0, oko 13 % kao razina 2 i 2,2 % kao razina 1. S druge strane, ti su se prosjeci u određenoj mjeri mijenjali tijekom noćnih uvjeta što je vidljivo na grafikonu 3. Naime, prosječan udio očitavanja razine 3 smanjio se za 8 % tijekom dnevnih uvjeta u usporedbi s noćnim uvjetima. Slično je i s razinom 2 gdje je prisutno smanjenje za gotovo 7 %, dok se udio razine 1 blago smanjio (1 %). Tijekom dnevnih uvjeta udio očitavanja razine 0 povećao se za 14 % u odnosu na noćne uvjete.



Grafikon 3. Udio ukupnih kvaliteta očitavanja tijekom dana i noći te njihove razlike (dan – noć)

Kako bi se ispitala statistička značajnost razlika između kvalitete detekcije oznaka na kolniku između uvjeta vidljivosti (dan/noć), korišten je Wilcoxonov test rangiranja. U tablici 6. vidljivi su rezultati navedenog testa zasebno za središnje i rubne linije na sve četiri dionice. Iz tablice se može zaključiti da za sve četiri dionice postoji statistički značajna razlika između dnevnog i noćnog očitavanja ($p < 0,05$). Ukupan broj uzoraka središnje linije, koji imaju bolju kvalitetu detekcije tijekom dana, zabilježen je na tri od četiri dionice i manji je u odnosu na noćne uvjete. Nadalje, na trećoj dionici ukupan broj uzoraka koji imaju bolju kvalitetu tijekom dana veći je u odnosu na noćne uvjete.

Tablica 6. Rezultati Wilcoxonovog testa za središnje i rubne oznake na testnim dionicama

Dionica	Usporedba	Središnja oznaka			Rubna oznaka		
		N	Z	Statistička značajnost	N	Z	Statistička značajnost
1	dan < noć	59,899	-14,62	< 0,05	15,296	-20,53	< 0,05
	dan > noć	40,474			16,304		
	dan = noć	98,369			34,646		
2	dan < noć	47,808	-261,61	< 0,05	43,594	-261,61	< 0,05
	dan > noć	45,717			7,134		
	dan = noć	97,415			15,221		
3	dan < noć	38,225	-14,26	< 0,05	49,825	-76,95	< 0,05
	dan > noć	40,965			36,401		
	dan = noć	157,066			51,933		
4	dan < noć	47,808	-8,29	< 0,05	-	-	-
	dan > noć	45,717			-		
	dan = noć	97,415			-		

Prosječni domet vidljivosti središnje linije za vrijeme noćnih uvjeta iznosio je $34,07 \pm 22,23$ m. S druge je strane domet vidljivosti povećan u dnevnim uvjetima i iznosio je u prosjeku $39,42 \pm 25,36$ m. Vrijednosti dometa vidljivosti rubne linije manje su nego kod središnje linije. Za dnevne uvjete prosjek iznosi $17,69 \pm 24,38$ m, dok za noćne uvjete iznosi $17,01 \pm 20,48$ m. Apsolutni prosjeci dometa vidljivosti za svaku prometnicu, liniju i uvjete vidljivosti prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Apsolutni prosjeci dometa vidljivosti za svaku prometnicu, crte i uvjete vidljivosti

Cesta 1				
Linija/uvjeti	Srednja vrijednost	St.dev.	95% pouzdanost	
			Donja granica	Gornja granica
Središnja – noć	33,16	21,89	33,07	33,26
Rubna – noć	15,67	20,54	15,58	15,76
Središnja – dan	38,93	24,66	38,82	39,04
Rubna – dan	21,43	27,25	21,31	21,55
Cesta 2				
Središnja – noć	33,83	20,58	33,72	33,94
Rubna – noć	9,58	15,72	9,49	9,66
Središnja – dan	41,57	24,64	41,44	41,71
Rubna – dan	6,09	16,77	6,00	6,18
Cesta 3				
Središnja – noć	42,68	22,82	42,58	42,77
Rubna – noć	25,79	25,19	25,69	25,89
Središnja – dan	46,43	24,17	46,34	46,53
Rubna – dan	25,53	29,11	25,42	25,65
Cesta 4				
Središnja – noć	26,60	23,64	26,49	26,71
Središnja – dan	30,72	27,96	30,59	30,84

Osim toga izračunate su razlike i standardna devijacija dometa vidljivosti za slučajeve kada je dnevna kvaliteta očitavanja veća u odnosu na noćnu i obrnuto. Prosječno razlika u dometu vidljivosti kada je dnevna kvaliteta očitavanja veća od noćne za središnju liniju iznosi oko 30 m sa standardnom devijacijom od otprilike 21 m. S druge strane, ako je kvaliteta tijekom noći bila veća, zabilježen je blagi pad dometa vidljivosti i standardne devijacije. Slični podaci dobiveni su i za rubnu crtu kao što je prikazano u tablici 8.

Tablica 8. Prosječne razlike u dometu vidljivosti rubne i razdjelne crte za svaku cestu i vidljivost

Cesta	Središnja linija				Rubna linija			
	Dan > Noć		Dan < Noć		Dan > Noć		Dan < Noć	
	Prosječna razlika (m)	St. dev.	Prosječna razlika (m)	St. dev.	Prosječna razlika (m)	St. dev.	Prosječna razlika (m)	St. dev.
1	26,43	18,36	22,97	17,30	37,40	21,03	21,31	17,51
2	31,39	25,90	26,26	24,00	38,80	20,93	29,30	15,12
3	27,68	21,03	24,95	18,03	40,71	25,31	32,74	22,47
4	30,67	19,77	30,00	18,39	-	-	-	-
Prosječno	29,04	21,26	26,04	19,43	38,97	22,42	27,78	18,36

Nadalje, t-test uparenih uzoraka korišten je kako bi se testirala statistička značajnost razlike između noćnih i dnevnih uvjeta za svaku liniju na svakoj analiziranoj cesti. Stvoreno je ukupno sedam parova kao što je prikazano u tablici 9. Rezultati t-testa pokazuju statistički značajnu razliku u domet vidljivosti svih parova ($p < 0,005$). Drugim riječima, domet vidljivosti Mobileye kamere razlikuje se za sve testne slučajeve između dnevnih i noćnih uvjeta.

Tablica 9. Rezultati t-testa uparenih uzoraka

Cesta/Par		Razlike					t	p
		Srednja vrijednost	St. dev.	Srednja vrijednost pogreške	95% interval pouzdanosti razlike			
					Donja	Gornja		
1	središnja – noć / središnja – dan	-5,76	29,51	0,06	-5,89	-5,63	-87,09	< 0,05
2	rubna – noć / rubna – dan	-5,76	27,11	0,06	-5,88	-5,64	-94,85	< 0,05
3	središnja – noć / središnja – dan	-7,74	30,22	0,08	-7,90	-7,57	-93,02	< 0,05
4	rubna – noć / rubna – dan	3,49	22,76	0,06	3,36	3,61	55,67	< 0,05
5	središnja – noć / središnja – dan	-3,75	32,58	0,06	-3,88	-3,62	-56,04	< 0,05
6	rubna – noć / rubna – dan	0,25	35,78	0,07	0,11	0,40	3,49	< 0,05
7	središnja – noć / središnja – dan	-4,12	32,50	0,07	-4,26	-3,97	-55,39	< 0,05

8. RASPRAVA

Poboljšanje sigurnosti prometa danas je jedan od važnijih ciljeva svih zemalja svijeta. Bez obzira što se broj poginulih osoba u prometnim nesrećama u Europskoj uniji u zadnjih dvadeset godina smanjio, broj poginulih osim osobnih tragedija još uvijek predstavlja golemi trošak za društvo koji, ovisno o državi, iznosi od 1 do 3 % BDP-a [53].

Općenito gledajući, razinu sigurnosti prometa na cesti definira međusobna interakcija triju čimbenika: čovjeka, vozila i ceste. Statistike pokazuju kako čovjekova pogreška uzrokuje najveći broj prometnih nesreća, no često su navedene pogreške uzrokovane djelovanjem drugih čimbenika. Iako je mogućnost ljudske pogreške uvijek prisutna, unaprjeđenjem prometne infrastrukture i tehnološkim razvitkom vozila pokušava se dodatno umanjiti broj i posljedice tih pogrešaka, odnosno povećati sigurnost prometa na cestama [54].

Istraživanja i predviđanja vezana uz sigurnosne sustave u vozilima ukazuju na njihov značajan utjecaj na povećanje sigurnosti. U navedene sustave danas prvenstveno podrazumijevamo napredne sustave pomoći vozaču čija je osnovna funkcija upozoravanje vozača te preuzimanje kontrole u slučaju izostanka reakcije vozača. Primjene sustava za detekciju oznaka na kolniku mogu biti jednostavne poput ukazivanja položaja traka vozaču na vanjskom zaslonu do složenijih zadataka poput predviđanja promjene trake u trenutnoj budućnosti kako bi se izbjegli sudari s drugim vozilima, a sami sustavi koriste različite senzore (kamere, radare, lidare itd.) za prikupljanje podataka iz okoline.

Jedan od osnovnih naprednih sustava pomoći vozaču sustav je detektiranja i prepoznavanje oznaka na kolniku koji se koristi za upozoravanje vozača tijekom napuštanja prometne trake i/ili za pomoć vozaču pri zadržavanju lateralnog položaja vozila unutar kolničke trake. Međutim, da bi navedeni sustav mogao kvalitetno izvršavati svoju zadaću, nužno je osigurati da su oznake na kolniku zadovoljavajuće kvalitete. Istraživanja su pokazala kako kvaliteta detekcije oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom ovisi o nizu čimbenika kao što su: kvaliteta kamere, stanje, boja, širina i vidljivost oznaka na kolniku (dnevna vidljivost, noćna vidljivost – retrorefleksija i kontrast), konfiguracija označavanja (puna/isprekidana linija, duljina isprekidanih linija), brzina vožnje, vremenski uvjeti, općenita vidljivost okoline, smjer sunčevih zraka, karakteristike kolnika (vrsta, stanje i tekstura), geometrija ceste, vrsta ruba ceste (strukturirano/nestrukturirano) i kombinacija gore navedenih čimbenika [8, 9, 11].

S obzirom na to da su navedeni sustavi relativno nedavno u masovnijoj primjeni, još je uvijek niz nepoznanica vezanih uz to kako kvaliteta oznaka na kolniku utječe na kvalitetu

detekcije „machine-vision“ sustavom u vozilu. Iz tog je razloga provedeno istraživanje u sklopu ovog rada čiji je cilj bio utvrditi točnost detekcije oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom. Za navedeno istraživanje koristio se dinamički retroreflektometar tvrtke Zehntner (ZDR 6020) postavljen na mjerno vozilo Zavoda za prometnu signalizaciju Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu i Mobileye 360 kamera postavljena u testno vozilo Sveučilišta u Grazu. Istraživanje se sastojalo od dva testa. U prvom je testu cilj bio istražiti utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima, dok je cilj drugog testa bio usporediti detekciju oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta. Oba testa provedena su na četiri dionice u Republici Hrvatskoj ukupne duljine 120,8 km.

Rezultati prvog testa pokazuju da postoji statistički značajna razlika između prosječnog dometa vidljivosti kao i kvalitete detekcije oznaka ovisno o retrorefleksiji oznake. Naime, oznake s retrorefleksijom manjom od 100 mcd/lx/m^2 detektirane su s manjih udaljenosti u odnosu na oznake s retrorefleksijom višom od 100 mcd/lx/m^2 . Također, u slučajevima kada je kvaliteta detekcije bila 0 (ništa nije očitano) ili 1 (niska pouzdanost otkrivanja), prosječna retrorefleksija bila je znatno niža u odnosu na slučaj kada je kvaliteta detekcije bila 2 (srednja pouzdanost otkrivanja, $p < 0,001$) ili 3 (visoka pouzdanost otkrivanja, $p < 0,001$). Navedeni rezultat dodatno potvrđuje spoznaje iz studija [12, 41, 42], te ukazuje na to da je noćna vidljivost, odnosno retrorefleksija od ključnog značaja ne samo za ljudske vozače već i za napredne sustave pomoći vozaču. Naime, u noćnim je uvjetima značajno smanjena količina dostupnih vizualnih informacija te retrorefleksija oznaka predstavlja jedinu mogućnost za stvaranje kontrasta između oznake i tamne okoline. Iako je „machine-vision“ sustav korišten u ovom radu mogao detektirati oznake na kolniku čija je retrorefleksija manja od 100 mcd/lx/m^2 sama kvaliteta detekcije nije uvijek bila zadovoljavajuća što u konačnici može uzrokovati određene pogreške, odnosno pružanje krive informacije vozaču.

Rezultati drugog testa pokazuju da se detekcija oznaka na kolniku mijenja ovisno o uvjetima vidljivosti u okruženju. Naime, prosječni udio očitavanja razine 3 i 2 (najbolje razine očitavanja) smanjio se za 8 % i 7 % danju u odnosu na noćne uvjete. Udio razine 1 bilježi neznatni pad od 1 % pa se može reći da je ostao približno isti, dok se udio očitavanja razine 0 danju povećao za 14 % u odnosu na noćne uvjete. Dva su moguća razloga za navedene rezultate. Naime, zbog promjene osvjetljenja u okolini, kontrast između oznake i kolnika može se smanjiti tijekom dnevnih uvjeta, što u konačnici može u određenoj mjeri negativno utjecati na detekciju oznaka od strane „machine-vision“ sustava. S druge strane, vidljivost oznaka na kolniku tijekom noći

postiže se uporabom retroreflektirajućih materijala (staklenih kuglica) te se na taj način stvara kontrast između oznake i tamnog okruženja. U noćnim uvjetima značajno je manje promjena u osvjetljenju okoline (okolina je u pravilu tamna), zbog čega je „machine-visionu“ lakše prepoznati kontrast između oznake i kolniku. Navedeni rezultati potvrđuju spoznaje iz studije provedene u Australiji [42] te sugeriraju da je nužno osigurati adekvatnu razinu kontrasta između oznake i kolniku kako bi se osigurala zadovoljavajuća detekcija u dnevnim uvjetima. S obzirom na to je prosječna sjajnost kolnika između 40 i 50 cd/m², preporuka literature je da kontrast između oznake i kolniku bude minimalno 3:1 [42].

Iako se kvaliteta detekcije smanjivala danju u odnosu na noćne uvjete, domet vidljivosti se povećavao. Apsolutni prosjek i standardna devijacija vidnog polja za središnju liniju tijekom dana bila je $39,42 \pm 25,36$ m u usporedbi s noćnim uvjetima $34,07 \pm 22,23$ m. Domet detekcije rubnih linija bio je niži u usporedbi sa srednjim linijama i u dnevnim i u noćnim uvjetima, u prosjeku $17,69 \pm 24,38$ m, odnosno $17,01 \pm 20,48$ m. Moguć razlog takvih rezultata leži u starosti oznaka. Na tri ceste središnja linija bila je relativno nova (starosti do 6 mjeseci), a na jednoj cesti linija je bila starija od 1 godine. S druge strane, rubne linije na svim cestama bile su starije od 1 godine. Kako su sve oznake na analiziranim cestama izvedene bojom čiji je vijek trajanja oko jedne godine [56], starije oznake, u ovom slučaju rubne, bile su detektirane na kraćim udaljenostima u odnosu na novije središnje linije. Nadalje, za sve oznake na kolniku relativno visoka standardna odstupanja dometa oko 20 m sugeriraju da vidljivost i geometrija ceste imaju važnu ulogu u otkrivanju oznaka na kolniku [41, 42].

Provedeno istraživanje ima i nekoliko ograničenja. Manji dijelovi testnih dionica koje prolaze kroz naseljena područja isključeni su iz analize jer na tim područjima postoji cestovna rasvjeta, a cilj je bio analizirati isključivo utjecaj retrorefleksije (noćne vidljivosti) na detekciju oznaka na kolniku. Također, u ovom istraživanju u obzir nisu uzeta svojstva vidljivosti oznaka na kolniku s obzirom na to da je glavni cilj istraživanja bio usporediti kvalitete otkrivanja i dometa vidljivosti „machine-vision“ sustava tijekom dana i noći te analizirati kako se mijenjaju vrijednosti ovisno o uvjetima vidljivosti. Iz navedenog razloga potrebna su daljnja istraživanja kako bi se utvrdio odnos dnevne i noćne vidljivosti s kvalitetom detekcije i dometu vidljivosti sustava potpore bočnog položaja vozila. U istraživanju nije procijenjen utjecaj različite konfiguracije isprekidanih linija na otkrivanje oznaka, zbog nedostatka podataka o točnom položaju svake vrste isprekidanih linija. Postojeća literatura jedino ukazuje da je uporabom „machine-vision“ sustava otkrivanje punih linija bolje nego otkrivanje isprekidanih linija istih karakteristika kao što su širina, održavanje itd. Nadalje, na rezultat bi moglo utjecati vrijeme

provedbe dnevnog mjerenje između 10:15 i 13:00 h, jer smjer sunca utječe na otkrivanje oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavima [41,42]. S obzirom na to da je mjerenje provedeno isti dan kada je bilo vedro i bez oborina i na cesti smjera suprotnog od smjera sunca, odnosno smjera sjever – jug, moguće je zanemariti navedeni utjecaj smjera sunca na rezultate.

Buduća istraživanja trebala bi se, osim utvrđivanja povezanosti dnevne i noćne vidljivosti s kvalitetom detekcije i dometom sustava potpore bočnog položaja vozila, usredotočiti na istraživanje utjecaja drugih čimbenika na sustav potpore bočnog položaja vozila kao što su vremenski uvjeti, brzina vožnje, geometrija ceste, vrsta i stanje kolnika i njihova kombinacija. Također su potrebna eksperimentalna i cestovna istraživanja kako bi se proširenjem postojećeg znanja poboljšala cjelokupna kvaliteta „machine-vision“ sustava i kako bi se utvrdila odgovarajuća svojstva oznaka na kolniku.

9. ZAKLJUČAK

Promet predstavlja važan segment u suvremenom životu čovjeka, no isto tako predstavlja jedan od glavnih uzročnika smrti u svijetu. Općenito, na sigurnost cestovnog prometa utječu tri glavna čimbenika: čovjek, vozilo te cestovna infrastruktura i njena okolina. Ponajprije, sigurnost prometa na cestama ovisi o ponašanju sudionika u prometu. S obzirom na to da postoji mogućnost ljudske pogreške i neprihvatljivog i nepredvidivog ponašanja, čovjek se smatra čimbenikom koji najviše utječe na nastanak prometne nesreće. Ipak, cestovna infrastruktura i vozilo kao čimbenici sigurnosti prometa svojim nedostacima također značajno utječu na nastanak prometne nesreće, odnosno na nemogućnost njezinog izbjegavanja. Iz tog su razloga suvremene strategije sigurnosti cestovnog prometa usmjerene na proaktivan, interdisciplinarni te višekriterijski pristup koji obuhvaća djelovanje u području edukacije sudionika u prometu, zakonske regulative, cestovne infrastrukture vozila itd.

Zadnje desetljeće značajan napredak postignut je razvojem sigurnosnih sustava unutar samih vozila kao što su napredni sustavi pomoći vozaču koji nadgledanjem i kontroliranjem raznih parametara vozila i njegove okoline otkrivaju potencijalne opasnosti te upozoravaju vozača ili preuzimaju kontrolu nad vozilom. Osnovu navedenih sustava čine senzori (kamere, laseri, lidari itd.) koji prikupljaju potrebne podatke o fizičkim parametrima povezanim s automobilom, okruženjem i vozačem. Niz istraživanja je pokazao kako navedeni sustavi, ovisno o njihovoj funkciji i razini implementacije, mogu značajno smanjiti broj prometnih nesreća kao i njihove posljedice. Jedan od osnovnih sustava je sustav za održavanje vozila unutar kolničke trake, odnosno za održavanje lateralnog položaja vozila. Statistike pokazuju da su upravo prometne nesreće uzrokovane napuštanjem prometne trake jedne od najčešćih i najsmrtonosnijih. Upravo iz tog razloga sustav koji bi mogao dati upozorenje vozačima da napuštaju prometnu traku ima veliki potencijal za spašavanje velikog broja ljudskih života.

Međutim, za pravilan rad dijela navedenih sustava nužna je i kvalitetna infrastruktura što dokazuju i rezultati ovog rada. Rezultati istraživanja potvrđuju postojanje statistički značajne razlike u kvaliteti detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta. Ipak, suprotno očekivanju i definiranoj prvoj hipotezi detekcija oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom kvalitetnija je u noćnim uvjetima u odnosu na dnevne uvjete. Na temelju dosadašnjih spoznaja iz literature može se doći do zaključka da je to zbog vizualne složenosti tijekom dnevnih uvjeta i u određenoj mjeri promjenjivih razina osvjetljenja što u konačnici može uzrokovati smanjenje kontrasta između oznake i površine kolnika. Nadalje, s povećanjem retrorefleksije (noćne vidljivosti) oznaka na kolniku dolazi do njihove

kvalitetnije detekcije „machine-vision“ sustavom u noćnim uvjetima što potvrđuje drugu hipotezu istraživanja. Također, domet vidljivosti razlikovao se ovisno o vidljivosti oznaka koja je povezana s njihovom starošću, ali isto tako i o geometriji ceste što potvrđuje treću hipotezu istraživanja.

Iz svega navedenog može se zaključiti da vidljivost oznaka na kolniku, kao njihova glavna kvalitativna karakteristika, uvelike utječe na točnost i kvalitetu detekcije „machine-vision“ sustavom u vozilima i da je nužno osigurati njihovu adekvatnu vidljivost. Potencijalno rješenje leži u primjeni kvalitetnih i atestiranih materijale za oznake na kolniku, praćenju kvalitete oznaka tijekom njihovog životnog vijeka i pravovremenom održavanju samih oznaka. Iako ovo istraživanje predstavlja pilot istraživanje, dobiveni rezultati mogu pomoći upraviteljima cesta u definiranju i planiranju održavanja oznaka na kolniku čime će se osigurati njihova zadovoljavajuća kvaliteta nužna za ljudske vozače, ali i napredne sustave pomoći vozaču.

10. ZAHVALE

Zahvaljujemo mentoru dr. sc. Dariju Babiću na savjetima, strpljenju, pomoći pri istraživanju. Također, zahvaljujemo se svim zaposlenicima Zavoda za prometnu signalizaciju Fakulteta prometnih znanosti na savjetima, pomoći i podršci.

LITERATURA

- [1] Svjetska zdravstvena organizacija, Cestovne ozljede. Dostupno na: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> (10.6.2021.)
- [2] European Commission, Road safety: Europe's roads are getting safer but progress remains too slow, Brussels, 11.6.2020. Dostupno na: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_1003 (20.4.2021.)
- [3] European Road Safety Observatory, Road safety targets, Monitoring report, studeni 2020. Dostupno na: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/monitoring_report_november_2020.pdf (20.4.2021.)
- [4] European Commission, Sustainable Mobility for Europe: safe, connected and clean, Brussels, 17.5.2018. Dostupno na: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar%3A0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_2&format=PDF (22.4.2021.)
- [5] Cerovac, V.: Tehnika i sigurnost prometa, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2001.
- [6] Analiza kritičnih čimbenika nastanka prometnih nesreća, Zavod za Prometno Planiranje, Fakultet prometnih znanosti, svibanj 2020.
- [7] Federal Highway Administration. Roadway Departure Safety, 2020. Dostupno na: https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/ (11.6.2021.)
- [8] Sternlund, S. (2017.) The safety potential of lane departure warning systems - A descriptive real-world study of fatal lane departure passenger car crashes in Sweden, *Traffic Injury Prevention*, vol. 18, no. 1, 18-23, Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/15389588.2017.1313413>
- [9] Sternlund, S., Strandroth, J., Rizzi, M., Lie, A. and Tingvall, C. (2017.) The effectiveness of lane departure warning systems - A reduction in real-world passenger car injury crashes, *Traffic Injury Prevention*, vol. 18, no. 2, 225-229, Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/15389588.2016.1230672>
- [10] Penmetsa, P, Hudnall, M., and Nambisan, S. (2019.) Potential safety benefits of lane departure prevention technology, *IATSS Research*, vol. 43, no. 1, 21-26, Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2018.08.002>
- [11] Babić, D., Fiolić, M., Babić, D. and Timothy G. (2020.) Road markings and their impact on driver behaviour and road safety: A systematic review of current findings,

Journal of Advanced Transportation, Article ID 7843743, Dostupno na:
<https://doi.org/10.1155/2020/7843743>

- [12] Potters Industry and Mobileye. Pavement Markings Guiding Autonomous Vehicles (2016.) A Real World Study, Dostupno na:
<https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/14c12c18-fde1-4c1d-8548-035ad166c766/UploadedImages/documents/Breakouts/20-2%20Physical%20Infrastructure.pdf>
- [13] European Commission, Public support measures for connected and automated driving, Brussel, 2017., Dostupno na: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0f3e5c98-66ad-11e7-b2f2-01aa75ed71a1/language-en> (3.5.2021.)
- [14] Ziebinski A., Cupek R., Erdogan H., and Waechter S. (2016.), A Survey of ADAS Technologies for the Future Perspective of Sensor Fusion, 2(9876) 135–146 DOI: 10.1007/978-3-319-45246-3_13
- [15] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Advanced-Driver-Assistance-Systems%3A-A-Path-Toward-Kukkala-Tunnell/9effdc53bd2c6efb1fce95d87e1ca18ec0765c2c> (29.3.2021.)
- [16] Abdulbaqi Jumaa B., Mousa Abdulhassan A., Mousa Abdulhass A. (2019.) Advanced Driver Assistance System (ADAS): A Review of Systems and Technologies, *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)* vol 8, no. 6, 2278 - 1323
- [17] URL:<https://www.openpr.com/news/1786541/forward-collision-warning-system-for-automotive-key-players-are-delphi-technologies-robert-bosch-gmbh-denso-corporation-autoliv-inc-becker-mining-wabtec-corporation-siemens-collins-aerospace-alstom-general-electric-honeywell-international-inc.html> (30.3.2021.)
- [18] URL:<https://www.torque.com.sg/features/how-does-automatic-emergency-braking-work/> (30.03.2021.)
- [19] Benson, A.J., Tefft, B.C., Svancara, A.M., & Horrey, W.J. (2018). Potential Reductions in Crashes, Injuries, and Deaths from Large-Scale Deployment of Advanced Driver Assistance Systems (Research Brief), Washington
- [20] URL:<http://www.stikluserviss.lv/wp-content/uploads/2016/12/LANE-ASSIST.jpg> (2.4.2021.)
- [21] URL:<https://www.burgdesign.com.au/reversing-cameras/parksafe-blind-spot-detection-system> (2.4.2021.)
- [22] URL: <https://lancmoms.com/rear-cross-traffic-alert-technology/> (2.4.2021.)

- [23] European Commission, European Road Safety Observatory, Advanced driver assistance systems, Brussels, 2018. Dostupno na: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/default/files/pdf/ersosynthesis2018-adas.pdf
- [24] Dutch Safety Board. Who is in control? Road safety and automation in road traffic, Hague (studeni, 2019.). Dostupno na: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/GRVA-05-48e.pdf>
- [25] Europska Komisija, Na putu prema automatiziranoj mobilnosti: strategija EU-a za mobilnost budućnosti, Bruxelles, 17.5.2018. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0283&from=es>
- [26] Economic Commission for Europe Inland Transport Committee World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, 23.1.2014. Dostupno na: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29resolutions/ECE-TRANS-WP29-78-r3e.pdf>
- [27] URL: <https://www.europarl.europa.eu/meps/en/map.html>. (15.3.2021.)
- [28] URL:https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/old/what_can_be_done_about_it/adas (15.3.2021.)
- [29] URL:<https://aaafoundation.org/vehicle-owners-experiences-reactions-advanced-driver-assistance-systems/>. (20.3.2021.)
- [30] Tan, H.; Zhao, F.; Hao, H.; Liu, Z. Estimate of Safety Impact of Lane Keeping Assistant System on Fatalities and Injuries Reduction for China: Scenarios Through 2030. *Traffic Injury Prevention*, 2020, 21(2), 156-162. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/15389588.2020.1711518>
- [31] Jermakian, J. S. Crash Avoidance Potential of Four Passenger Vehicle Technologies. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, 43(3), 732–740. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.020>
- [32] Jermakian, J. S. Crash Avoidance Potential of Four Large Truck Technologies. *Accident Analysis & Prevention*, 2012, 49, 338–346. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.033>
- [33] Kusano, K. D.; Gabler, H. C. Comparison of Expected Crash and Injury Reduction from Production Forward Collision and Lane Departure Warning Systems. *Traffic Injury Prevention*, 2015, 16(2), 109-114. Dostupno na: <http://dx.doi.org/10.1080/15389588.2015.1063619>

- [34] Hickman, J. S. et al. Efficacy of Roll Stability Control and Lane Departure Warning Systems Using Carrier-Collected Data. *Journal of Safety Research*, 2015, 52, 59–63. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.12.004>
- [35] Spicer, R. et al. Field Effectiveness Evaluation of Advanced Driver Assistance Systems. *Traffic Injury Prevention*, 2018, 19(2), 91–95. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/15389588.2018.1527030>
- [36] Cicchino, J. B. Effects of Lane Departure Warning on Police-reported Crash Rates. *Journal of Safety Research*, 2018, 66, 61-70. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.05.006>
- [37] Kaur G., Kumar D., *International Journal of Computer Applications*, Lane Detection Techniques: A Review, vol. 12 no. 10, 0975 – 8887, veljača 2015.
- [38] Hadi, M., Sinha, P. & Easterling IV, J. R. (2007). Effect of Environmental Conditions on Performance of Image Recognition–Based Lane Departure Warning System. *Journal of the Transportation Research Board*, 2000(1), 114-120. Dostupno na: <https://doi.org/10.3141/2000-14>
- [39] Lundkvist, S. O. & Fors, C. (2010) *Lane Departure Warning System – LDW*, Linköping: VTI.
- [40] European Union Road Federation (2013). *Marking the Way Towards a Safer Future*, Brussels: ERF.
- [41] Texas A&M Transportation Institute (2018). *Evaluation of The Effects of Pavement Marking Characteristics on Detectability by ADAS Machine Vision*. Report, NCHRP Project 20-102(6).
- [42] Austroads (2020). *Implications of Pavement Markings for Machine Vision*. Report. Dostupno na: <https://austroads.com.au/publications/connected-and-automated-vehicles/ap-r633-20>.
- [43] Ščukanec A., Babić D.: *Metode mjerenja retrorefleksije prometnih znakova i oznaka na kolniku*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb 2013.
- [44] URL: <https://www.mobileye.com/our-technology/> (15.3.2021.)
- [45] URL:<https://iaasiaonline.com/mobileye-takes-another-step-towards-autonomous-vehicles-with-orange-business-services-2/> (25.3.2021.)
- [46] URL:<https://www.manualslib.com/manual/1840676/Mobileye-6-Series.html?page=6#manual> (15.5.2021.)
- [47] URL:<http://struna.ihjj.hr/naziv/kolmogorov-smirnovljev-test/30938/> (10.4.2021.)

- [48] Vulić, M.: Upotreba koeficijenta korelacije u procjeni podrijetla nitrata na području zagrebačkog vodonosnika, 2015., Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet
- [49] Petz B., Kolesarić V., Ivanec D.: Osnovne statističke metode za nematematičate, 2012.
- [50] URL: <https://bs.warbletoncouncil.org/prueba-u-de-mann-whitney-14919>
(11.4.2021.)
- [51] URL:<https://www.statisticshowto.com/wilcoxon-signed-rank-test/> (15.4.2021.)
- [52] URL:https://ldap.zvu.hr/~oliverap/MetodeIstrazivanjaFT/9_t-test.pdf
(16.4.2021.)
- [53] Ministarstvo unutarnjih poslova, Bilten o sigurnosti cestovnog prometa 2019., Zagreb, RH
- [54] Nacionalni program sigurnosti cestovnog prometa Republike Hrvatske 2011. – 2020. godine (NN 59/2011)
- [55] Babić, D., Ščukanec, A. and Babić, D. “Determining the correlation between daytime and night-time road markings visibility,” *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 11, no. 4, 283-290, 2016. Dostupno na: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.33>
- [56] Babić, D. (2018.) Model predviđanja trajanja oznaka na kolniku. Doktorski rad. Sveučilište u Zagreb, Fakultet prometnih znanosti. Dostupno na: <https://repozitorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A1202/datastream/PDF/view>

SAŽETAK

Lucija Franković, Anamarija Jembrek, Ivana Kučina

UTVRĐIVANJE TOČNOSTI DETEKCIJE OZNAKA NA KOLNIKU „MACHINE VISION“ SUSTAVOM

U svijetu oko 1,35 milijuna ljudi smrtno strada od posljedica prometnih nesreća godišnje, dok između 20 i 50 milijuna ljudi zadobije određene ozljede. Pogreške koje dovode do prometnih nesreća mogu biti uzrokovane čovjekom, cestom ili vozilom, ali i njihovim međusobnim djelovanjem. Kako bi se umanjila mogućnost pogreške navedenih čimbenika, ulaže se veliki trud u razvijanju novih tehnologija i sigurnosnih sustava kao što su napredni sustavi pomoći vozaču (engl. *Advanced Driver Assistance Systems - ADAS*) koji postaju sastavni dio opreme današnjih vozila. ADAS sustavi svoj rad temelje na percepciji pomoću kamera, Radara ili Lidara, odnosno percipiraju okolinu vozila uz pomoć „machine-vision“ sustava. Jedan od osnovnih ADAS sustava je i sustav detekcije oznaka na kolniku. Sama detekcija oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom ovisi o nizu čimbenika, a jedan od njih je i vidljivost oznaka. Iz tog razloga cilj ovog rada utvrditi je na koji način vidljivost oznaka na kolniku utječu na sustav detekcije oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom implementiranim u vozilo. Istraživanje se sastojalo od dva testa: 1) utjecaj retrorefleksije oznaka na kolniku na sustav detekcije oznaka na kolniku u noćnim uvjetima i 2) usporedba kvalitete detekcije oznaka na kolniku i dometa vidljivosti između dnevnih i noćnih uvjeta.

Provedenim ispitivanjem i obradom podataka potvrđuje se postojanje značajne razlike u kvaliteti detekcije oznaka na kolniku „machine-vision“ sustavom ovisno o kvaliteti samih oznaka, ali i o uvjetima osvjetljenja okoline. Drugim riječima, detekcija oznaka na kolniku bit će bolja u noćnim uvjetima u odnosu na dnevne i u slučaju kada oznake imaju višu razinu retrorefleksije. Također, domet pogleda „machine-vision“ sustava mijenja se u ovisnosti o kvaliteti oznake, ali i geometriji ceste.

Ključne riječi: sigurnost prometa, prometne nesreće, ADAS sustavi, machine-vision

SUMMARY

Lucija Franković, Anamarija Jembrek, Ivana Kučina

DETERMINATION OF THE ACCURACY OF ROAD MARKINGS DETECTION BY THE MACHINE VISION SYSTEM

Worldwide, about 1.35 million people die as a result of road accidents each year, and between 20 and 50 million people suffer certain injuries. Errors that lead to traffic accidents can be caused by human, road or vehicle factor, but also by their interaction. As the possibility of error of these factors has been reduced, great effort has been made to develop new technologies and safety systems such as Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), which are an integral part of today's vehicle equipment. ADAS base their work on perception using a camera, Radar or Lidar, i.e. they perceive the surrounding vehicles with a machine-vision system. One of the basic ADAS systems is the pavement marking detection system. Detection of markings on the pavement by the "machine-vision" system depends on a number of factors, and one of them is the visibility of the markings. For this reason, the aim of this paper is to determine how day and night visibility of road markings affects the system of detection of road markings by the machine-vision system implemented in the vehicle. The study consisted of two tests: 1) the effect of retroreflection of pavement markings on the pavement marking detection system at night and 2) A comparison of lane marking detection quality and view range between daytime and night-time conditions by machine-vision.

The conducted testing and data processing confirms the existence of a significant difference in the quality of road markings detection by the "machine-vision" system depending on the quality of the markings themselves, but also on the ambient lighting conditions. In other words, road markings detection will be better at night compared to daytime and in the case when the road markings have a higher level of retroreflection. Furthermore, the range of view of the "machine-vision" system changes depending on the quality of the road markings and also the geometry of the road.

Key words: traffic safety, traffic accidents, ADAS system, machine-vision

POPIS SLIKA, TABLICA I GRAFIKONA

Popis slika

Slika 1. Princip rada naprednih sustava pomoći vozaču	5
Slika 2. Sustav upozorenja na prednji sudar	6
Slika 3. Sustav automatske kočnice u nuždi	7
Slika 4. Sustav za zadržavanje prometne trake	8
Slika 5. Sustav otkrivanja vozila unutar mrtvog kuta.....	9
Slika 6. Upozorenje o stražnjem poprečnom prometu	10
Slika 7. Sustav za automatsko prepoznavanje prometnih znakova	11
Slika 8. Klasifikacija automatizacije	13
Slika 9. A) Ulazna slika; B) Filtrirana slika; C) Slika u sivim tonovima; D) Binarna slika; E) Izgladena slika; F) Slika prepoznatih rubova; G) Izgladena slika; H) Izlazna slika	20
Slika 10. Mjerno vozilo s montiranim uređajem ZDR 6020	26
Slika 11. Mobileye kamera (lijevo) te testno vozilo Sveučilišta u Grazu	27

Popis tablica

Tablica 1. Tehničke specifikacije Mobileye sustava.....	27
Tablica 2. Karakteristike testnih sekcija	28
Tablica 3. Sažetak deskriptivne/opisne statistike	32
Tablica 4. Spearmanovi koeficijenti korelacije između ispitivanih varijabli	32
Tablica 5. Sažetak razlike u prosječnom rasponu pogleda između kategorija prosječne retrorefleksije	33
Tablica 6. Rezultati Wilcoxonovog testa za središnje i rubne oznake na testnim dionicama ..	36
Tablica 7. Apsolutni prosjeci dometa vidljivosti za svaku prometnicu, crte i uvjete vidljivosti	37

Tablica 8. Prosječne razlike u dometu vidljivosti rubne i razdjelne crte za svaku cestu i vidljivost	37
Tablica 9. Rezultati t-testa uparenih uzoraka.....	38

Popis grafikona

Grafikon 1. Usporedba očitavanja Mobileye sustava (razina kvalitete) između mjerenja kvalitete noću i danju za središnju oznaku	34
Grafikon 2. Usporedba očitavanja Mobileye sustava (razina kvalitete) između mjerenja kvalitete noću i danju za središnju i rubnu oznaku	34
Grafikon 3. Udio ukupnih kvaliteta očitavanja tijekom dana i noći te njihove razlike (dan - noć)	35