



UNIVERZITET U NIŠU  
MAŠINSKI FAKULTET



**Milan G. Pavlović**

**PRIMENA INTELIGENTNIH SISTEMA MAŠINSKE  
VIZIJE KOD AUTONOMNOG UPRAVLJANJA  
ŽELEZNIČKIM VOZILIMA  
DOKTORSKA DISERTACIJA**

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,  
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању  
("Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 44/2010,  
93/2012, 89/2013 и 99/2014)

**НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:**

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, "Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012).

**Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе,  
осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.**

Niš, 2020.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL  
ENGINEERING



**Milan G. Pavlović**

**APPLICATION OF INTELLIGENT MACHINE VISION  
SYSTEMS FOR AUTONOMOUS TRAIN OPERATION**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2020.

## Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	dr Vlastimir Nikolić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet
Naslov:	Primena inteligentnih sistema mašinske vizije kod autonomnog upravljanja železničkim vozilima
Rezime:	<p>Železnički saobraćaj je važan vid transporta i ima značajan ekonomski uticaj na industriju i svakodnevni život ljudi. Zbog svojih kapaciteta i složene infrastrukture, neophodno je raditi na njegovom stalnom razvoju i unapređenju. Automatizacija železničkog saobraćaja zahteva korišćenje inteligentnih sistema kao neophodni deo autonomnog železničkog vozila. Kako sa stanovišta bezbednog odvijanja saobraćaja postojanje objekta na koloseku i/ili u njegovoj blizini predstavlja potencijalnu prepreku odvijanju železničkog saobraćaja, a vidljivost ima veoma važnu ulogu u ispravnoj i pravovremenoj detekciji objekta na železničkoj infrastrukturi, ključni element takvog autonomnog železničkog vozila predstavlja sistem za detekciju prepreka na delu železničke infrastrukture, i to u uslovima smanjene vidljivosti.</p> <p>Predmet naučnog istraživanja ove doktorske disertacije je primena inteligentnih sistema mašinske vizije kod autonomnog upravljanja železničkim vozilima. Za potrebe detekcije prepreka na delu železničke infrastrukture u uslovima smanjene vidljivosti, u navedeni sistem su integrisane termovizijska kamera i sistem noćne vizije, spregnuti sa razvijenim naprednim algoritmom za obradu slike uz primenu alata veštačke inteligencije. Pored toga, vršena je ocena rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta. Rad sistema je testiran u okviru niza eksperimenata na terenu, i to na različitim lokacijama, u različitim uslovima vidljivosti i vremenskim uslovima, kroz realne scenarije.</p>
Naučna oblast:	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina:	Upravljanje sistemima i robotika
Ključne reči:	Mašinska vizija, uslovi smanjene vidljivosti, detekcija, ocena rastojanja, autonomno upravljanje železničkim vozilom
UDK:	
CERIF klasifikacija:	T 125 Automatizacija, robotika, kontrolni inženjering
Tip licence Kreativne zajednice	CC BY-NC-ND

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Vlastimir Nikolić, redovni profesor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering
Title:	Application of intelligent machine vision systems for autonomous train operation
Abstract:	<p>The railway is an important type of transport and has a significant economic impact on the industry and people's everyday life. Due to its capacities and complex infrastructure, it is necessary to work on its constant development and improvement. Railway automation requires the use of intelligent systems as a necessary part of an autonomous railway vehicle. As from the point of view of safe traffic, the existence of the object on the rail track and / or in its vicinity represents a potential obstacle to the railway traffic, and visibility has a very important role in correct and timely detection of the object on the railway infrastructure, a key element of autonomous railway vehicle is an obstacle detection system on the part of the railway infrastructure, in conditions of reduced visibility.</p> <p>The subject of scientific research of this doctoral dissertation is the application of intelligent machine vision systems in autonomous train operation. For the purpose of detecting obstacles on the part of the railway infrastructure in conditions of reduced visibility, a thermal imaging camera and a night vision system are integrated into the system, coupled with a developed advanced algorithm for image processing with artificial intelligence tools. In addition, the distance from the machine vision system to the detected object was estimated. The operation of the system was tested in a series of field experiments, at different locations, in different visibility conditions and weather conditions, through realistic scenarios.</p>
Scientific Field:	Mechanical Engineering
Scientific Discipline:	Control Systems and Robotics
Key Words:	Machine vision, reduced visibility conditions, detection, distance estimation, autonomous train operation
UDC:	
CERIF Classification:	T125 Automation, robotics, control engineering
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND



## Sadržaj

1. Uvod.....	7
1.1. Predmet istraživanja.....	7
1.2. Cilj istraživanja.....	9
1.3. Struktura rada.....	10
2. Digitalna akvizicija i obrada slika u mašinskoj viziji.....	11
2.1. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	16
2.1.1. Inteligentni transportni sistemi (ITS).....	17
2.1.2. Autonomna vozila.....	19
2.1.3. Železnica.....	25
2.2. Digitalna slika.....	29
2.3. Akvizicija digitalne slike.....	32
2.4. Obrada i analiza slike.....	36
2.4.1. Ujednačavanje histograma.....	39
2.4.2. Segmentacija.....	42
2.5. Termovizija.....	57
2.5.1. Osnove termografije.....	57
2.5.2. Snaga zračenja, odavanje zračenja i iradijansa.....	58
2.5.3. Emisivnost.....	59
2.5.4. Termovizijski sistemi.....	61
2.6. Noćna vizija.....	67
2.6.1. Fotokatoda.....	69
2.6.2. Mikrokanalna ploča.....	70
2.6.3. Fosforni ekran.....	71
2.6.4. Sistemi noćne vizije.....	74
3. Detekcija i prepoznavanje objekata na železničkoj pruzi.....	77
3.1. Detekcija i prepoznavanje koloseka i objekata primenom termovizijskog sistema.....	82
3.1.1. Detekcija i prepoznavanje koloseka primenom termovizijskog sistema.....	90
3.1.2. Detekcija i prepoznavanje objekata primenom termovizijskog sistema.....	114
3.2. Detekcija i prepoznavanje koloseka i objekata primenom sistema noćne vizije.....	130
3.2.1. Rezultati detekcije i prepoznavanja.....	133
4. Inteligentni algoritmi za segmentaciju slike.....	156
4.1. Primena genetskog algoritma za određivanje optimalne vrednosti visokog praga Canny detektora ivica.....	160



---

4.2. Primena genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti visokog i niskog praga Canny detektora ivica.....	163
5. Ocena rastojanja objekata na železničkoj pruzi u odnosu na sistem kamera.....	165
5.1. Pregled dosadašnjih istraživanja .....	167
5.2. Ocena rastojanja primenom homografije .....	171
5.3. Ocena rastojanja primenom FuzzyH sistema.....	183
5.4. Ocena rastojanja primenom veštačke neuronske mreže .....	191
5.5. Uporedna analiza rezultata ocene rastojanja.....	199
6. Inteligentni integrisani sistem za autonomno železničko vozilo .....	202
7. Zaključak .....	208
8. Literatura.....	211
9. Popis slika.....	237
10. Popis tabela.....	246
11. Biografija autora .....	247



## **1. Uvod**

Železnički saobraćaj predstavlja veoma važnu komponentu u svakodnevnom transportu putnika i robe. Svojim kapacitetom i složenom infrastrukturom zauzima značajno mesto u privrednom poslovanju i svakodnevnom životu ljudi. Međutim, postoje mnogi bezbednosni izazovi koji utiču na redovno funkcionisanje železničkog saobraćaja. Naročito, opasna mesta predstavljaju konfliktne tačke, odnosno mesta na kojima se ukrštaju tokovi železničkog i drumskog saobraćaja. Takođe, na železničkoj infrastrukturi, odnosno koloseku, mogu se naći objekti koji predstavljaju prepreku zbog koje može doći do usporavanja ili potpunog zaustavljanja saobraćaja. Ukrštanje tokova železničkog i drumskog saobraćaja, odnosno železničke pruge i puta, pešačke i biciklističke staze (pružni prelazi) može biti izvršeno na dva načina: van koloseka i u nivou koloseka [1]. Sa bezbednosnog aspekta, putni prelazi u nivou koloseka predstavljaju konfliktne tačke i opasna mesta zbog čestih saobraćajnih nezgoda. Putni prelazi u nivou koloseka su osvetljeni, obeleženi i opremljeni odgovarajućom opremom na propisan način. Međutim, često se formiraju neuređeni prelazi, koji su nastali zbog različitih potreba ljudi. Ovakvi prelazi nisu projektovani, obeleženi i opremljeni odgovarajućom opremom ili uređajima za bezbedno odvijanje saobraćaja, i mogu biti formirani na neobezbeđenim mestima železničke infrastrukture, odnosno delu koloseka, i predstavljaju opasna mesta. U Republici Srbiji, u 2019. godini, dogodila se ukupno 41 saobraćajna nezgoda na putnim prelazima sa 17 povređenih osoba i 2 smrtna ishoda [2]. Poređenja radi, 2018. godine dogodilo se ukupno 55 saobraćajnih nezgoda na putnim prelazima u nivou koloseka sa ukupno 32 poginule i teško povređeno osobe (iz podataka su isključena samoubistva) [3]. Zvanični podaci o broju saobraćajnih nezgoda na neuređenim pružnim prelazima nisu javno dostupni.

Sa stanovišta bezbednog odvijanja saobraćaja, postojanje objekta na pružnom prelazu, odnosno na delu koloseka ili u okviru granice opasnog područja, predstavlja potencijalnu prepreku u odvijanju železničkog saobraćaja. Opažanje (detekcija) objekta i prepoznavanje da li objekat predstavlja prepreku ili ne, kao i ocena rastojanja od vučnog železničkog vozila do objekta, zavisi od procene lica koje upravlja vozilom, odnosno mašinovođe. Pravilna i pravovremena procena mašinovođe i druge okolnosti (brzina kretanja, konstrukcija vučnog

vozila, vozna kompozicija, itd.) utiču na zaustavni put. Ovaj put se sastoji od puta reagovanja i puta kočenja. Put reagovanja je put koji kompozicija pređe za vreme koje je potrebno mašinovođi da reaguje na prepreku, odnosno da je detektuje, oceni rastojanje i donese odluku o trenutku početka kočenja i intenzitetu kočione sile, i vremenu potrebnom uređajima za kočenje da počnu delovati. Ovaj niz složenih i odgovornih aktivnosti je baziran na okolnostima (zdravstveno i psiho-fizičko stanje, vidljivost, preglednost, itd.), znanju i iskustvu mašinovođe, a rezultira odlukom od koje može zavisiti da li će doći do saobraćajne nezgode ili ne, i težina posledice nezgode. Put kočenja je put koji kompozicija pređe za vreme trajanja kočenja i zavisi od brzine i stanja koloseka.

Vidljivost ima ključnu ulogu u ispravnoj i pravovremenoj detekciji objekta na železničkoj infrastrukturi. Međutim, vidljivost objekta je dobra u dnevnim uslovima i u noćnim uslovima, ali samo na delu infrastrukture gde postoji dovoljna količina osvetljenja. U uslovima smanjene vidljivosti na delu infrastrukture, gde nema osvetljenja ili postoji osvetljenje ali nije dovoljno, opažanje objekta je značajno otežano. Pored toga, loši vremenski uslovi imaju značajan uticaj na smanjenje vidljivosti. U takvim uslovima, ispravna i pravovremena detekcija i ocena od strane mašinovođe je neizvesna, te može doći do zakasnele reakcije i nemogućnosti pravovremenog zaustavljanja kompozicije, odnosno konkretne opasnosti ili saobraćajne nezgode.

Sa druge strane, dalji razvoj i unapređenje železničkog saobraćaja je uslovljen povećanjem efikasnosti, kapaciteta i kvaliteta usluga. Međutim, u poređenju sa drugim vidovima saobraćaja, železnica ima veoma malo sistema koji na neki način automatizuju određene radnje, većim delom zbog visokih standarda bezbednosti i kompleksnosti infrastrukture. Ipak, poslednjih godina se intenzivno radi na automatizaciji železnice, kako bi se stvorila mogućnost da se korisnicima ponudi ekonomična, fleksibilna i atraktivna usluga.

## **1.1. Predmet istraživanja**

Razvoj autonomnih sistema u železnici je uglavnom fokusiran na usluge javnog prevoza u vid metroa i korišćenja lakih šinskih vozila ali, iako danas postoji više linija koje su automatizovane na različitim nivoima, te linije saobraćaju u zatvorenim sistemima sa kratkim intervalima. Međutim, u železničkom saobraćaju koji se odvija na regionalnim i međunarodnim prugama, ali i u urbanizovanim područjima, jedan od glavnih bezbednosnih izazova je postojanje objekta na koloseku, koji može dovesti do usporavanja ili potpunog zaustavljanja saobraćaja, ili čak i do saobraćajne nezgode. Poseban izazov predstavljaju uslovi smanjene





vidljivosti i loši vremenski uslovi, u kojima veoma često nije moguće videti objekat, a samim tim ga i pravovremeno detektovati i eventualno zaustaviti voznu kompoziciju. Zbog toga, ključni element autonomnog upravljanja železničkim vozilom predstavlja sistem za detekciju objekata, odnosno potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture, i to u uslovima smanjene vidljivosti.

Predmet naučnog istraživanja ove doktorske disertacije je primena inteligentnih sistema mašinske vizije kod autonomnog upravljanja železničkim vozilima. Istraživanje je usmereno na analizu mogućih metoda za detekciju objekata i analizu specifičnosti uslova smanjene vidljivosti. Zatim, istraživanjem je obuhvaćen razvoj inteligentnih sistema mašinske vizije za detekciju i prepoznavanje objekata u uslovima smanjene vidljivosti uz primenu alata veštačke inteligencije. Kako je neophodno izvršiti i ocenu rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta, istraživanjem je obuhvaćena i analiza metoda za ocenu rastojanja, razvoj inteligentnih sistema mašinske vizije za ocenu rastojanja od sistema do detektovanog objekta uz primenu alata veštačke inteligencije i primenu inteligentnog integrisanog sistema kod autonomnog upravljanja železničkim vozilom.

## **1.2. Cilj istraživanja**

Cilj naučnog istraživanja je razvoj inteligentnog sistema mašinske vizije i njegova primena kod autonomnog upravljanja železničkim vozilima. Kao neophodni korak ka razvijanju navedenog sistema, istraživanjem je obuhvaćena analiza različitih algoritama za detekciju objekata i uslova smanjene vidljivosti na terenu. Navedene analize su imale važnu ulogu u razvoju, podešavanju i testiranju sistema mašinske vizije za detekciju objekata u realnim uslovima smanjene vidljivosti. Pored toga, za potrebe razvoja, podešavanja i testiranja sistema mašinske vizije za ocenu rastojanja u realnim uslovima smanjene vidljivosti, prethodno je izvršena analiza metoda za ocenu rastojanja, a istraživanjem je obuhvaćena i primena inteligentnog integrisanog sistema kod autonomnog upravljanja železničkim vozilom.

U sistem mašinske vizije su integrisane kamere spregnute sa naprednim algoritmom za obradu slike uz primenu alata veštačke inteligencije. S obzirom da je vidljivost objekta od ključne važnosti za pravilnu i pravovremenu detekciju, a time i ocenu rastojanja, sistem mašinske vizije može da radi u uslovima smanjene vidljivosti. Podatke koje sistem kamera prikupi predstavljaju ulazne podatke za algoritam za obradu slike čiji je zadatak da vrši detekciju objekata. Nakon detekcije, izvršena je ocena rastojanja od sistema do detektovanog



objekta. Sistem je eksperimentalno testiran na terenu u različitim uslovima smanjene vidljivosti i scenarijima, kako bi se postigla njegova veća pouzdanost i robustnost.

### **1.3. Struktura rada**

Doktorska disertacija se sastoji od jedanaest poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvodna razmatranja u kome su predstavljeni predmet i cilj istraživanja. U drugom poglavlju, predstavljen je pregled dosadašnjih istraživanja primene sistema mašinske vizije u oblastima inteligentnih transportnih sistema, autonomnih vozila i železnice. U istom poglavlju su predstavljene osnove digitalne slike i akvizicije, tehnike obrade i analize slike i teorijske osnove i primene termovizijskih sistema i sistema noćne vizije.

U trećem poglavlju, predstavljen je sistem za detekciju i prepoznavanja objekata na železničkoj pruzi primenom termovizijskog sistema i sistema noćne vizije, kao i rezultati. U četvrtom poglavlju predstavljena je primena genetskih algoritama za segmentaciju slike. U petom poglavlju predstavljen je pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti ocene rastojanja, a zatim i tri metode za ocenu rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta, sa uporednom analizom rezultata ocene. U šestom poglavlju su prikazana razmatranja o autonomnom železničkom vozilu i inteligentni integrisani sistem za navedeno vozilo.

U sedmom poglavlju su predstavljeni zaključci ove doktorske disertacije i pravci daljih istraživanja. U osmom poglavlju je dat prikaz korišćene literature, u devetom i desetom poglavlju popis slika i tabela, a u jedanaestom poglavlju biografija autora ove doktorske disertacije.

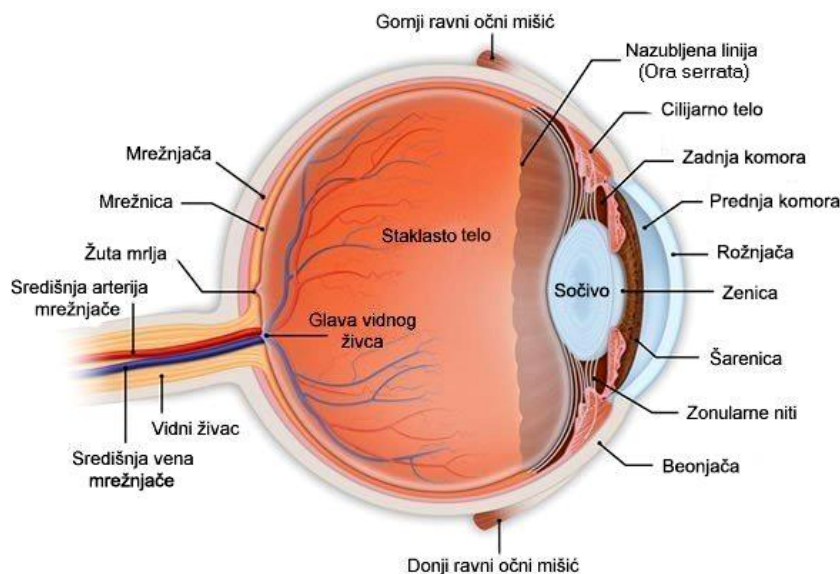
## 2. Digitalna akvizicija i obrada slika u mašinskoj viziji

Vid je veoma važan za preživljavanje skoro svake vrste, pa tako životinje poput riba, vodozemaca, gmizavaca, ptica i sisara, imaju čulo vida, a insekti, paukovi, rakovi i mekušci imaju optičke senzore za traženje hrane, skloništa i otkrivanje predatora. Čak su i neki jednoćelijski organizmi fotoosetljivi, iako nemaju organe koji mogu da formiraju sliku visoke rezolucije. Vid daje velike prednosti svakom organizmu jer, u poređenju sa mirisom, zvukom i vibracijom, omogućava veću osetljivost i bolje razumevanje i doživljavanje okoline u kojoj organizam obitava. Kao jedan od važnih činilaca za život čoveka, pored ostalih čula, čulo vida je veoma važno za njegov svakodnevni život, od bebe koja na osnovu izgleda lica zaključuje da li joj je osoba poznata, zatim u toku odrastanja dete upoznaje okolinu, oblike, boje, itd. Sa druge strane, ceo sistem obrazovanja je baziran na vizuelnom usvajanju znanja, kroz slova, slike, dijagrame, itd. (osim u slučaju slepih i slabovidih osoba). Za realizaciju većine radnih zadataka, koristi se vid, u industriji, medicini, obrazovanju, itd. Dokolica i zabava se, između ostalog, oslanja na čulo vida, kroz televizijske emisije, filmove, knjige, sport, itd.

Čovek ima pet čula – čulo vida, sluha, mirisa, ukusa i dodira, a čulo vida omogućava čoveku da dobije više od 80 % podataka o svetu koji ga okružuje brzinom koja odgovara brzini od preko 10 Mb/s [4]. Veliki deo ovih informacija je suvišan i komprimiran je raznim slojevima vizuelnog korteksa, tako da viši centri mozga moraju apstraktno da protumače samo mali deo podataka. Organ čula vida kod čoveka je oko i jeste „prozor” koji mu omogućava da vidi različite oblike, boje, dimenzije i dr. Oko je smešteno u očnoj duplji. Iako ne postoji univerzalni sporazum o normativnim podacima, može se reći da ljudsko oko (očna jabučica) ima dimenzije 24 mm (aksijalno, anteroposteriorno) × 23,5 mm (vodoravno, poprečno) × 23 mm (vertikalno, sagitalno), pri čemu se, kod odraslih osoba, dimenzije mogu razlikovati za jedan do dva milimetra. Spoljašnji deo oka čine beonjača i dužica (šarenica, lat. *iris*), a unutrašnji deo oka čine rožnjača (lat. *cornea*), očno sočivo (lat. *lens*), konjuktiva (lat. *conjunctiva*), očni nerv (lat. *nervus opticus*), žuta mrlja (lat. *makula latea*) i mrežnjača (lat. *retina*), i dr [5].

Proces stvaranja slike počinje tako što se svetlosni zrak odbija od predmeta iz okoline, ulazi u oko i prelama se kroz isto putem složenog dioptričkog sistema prozirnih optičkih

medija, rožnjače, očnog sočiva, staklastog tela (lat. *corpus vitreum*) i dr. Dužica reguliše količinu svetlosti koja ulazi u oko, skupljanjem ili širenjem centralnog otvora koji se naziva zenica (lat. *pupila*). Rožnjača i sočivo propuštaju oko 60-70% svetlosti. Njihova glavna svrha je da svetlost prelamaju tako da svetlosni zraci padnu tačno na mrežnjaču, odnosno na tačku najjasnijeg vida – žutu mrlju.



**Slika 2.1** Anatomija oka [6]

Sočivo ima sposobnost menjanja oblika iz izduženog i tankog u zaobljeno i debelo, što se naziva akomodacija i omogućava da fokus padne na mrežnjaču oka. Mrežnjača je deo nervnog sistema oka i poseduje splet nervnih ćelija – fotoosetljivih receptora, čepića i štapića. Kada svetlost padne na mrežnjaču, fotoosetljivi receptori se aktiviraju i pretvaraju svetlosni stimulans u električne impulse i putem očnog nerva se šalju informacije do kore velikog mozga u kome se nalazi kortikalni vidni centar [7]. Dobijene električne impulse, mozak obrađuje na odgovarajući način i formira konačnu sliku, koju čovek „vidi”. Čepići omogućavaju čoveku razlikovanje boja i centralni oštar vid, i najbolje funkcionišu pri relativno jakom osvetljenju. Postoje tri različite vrste čepića, tzv. crveni, zeleni i plavi, i sadrže različite fotoosetljive pigmente [8]. Štapići su osetljivi na svetlost slabog intenziteta, ali ne reaguju na boje, pa su skoro u potpunosti odgovorni za periferni i noćni vid. Oko 20-30% svetlosti se gubi usled rasipanja u očnim medijima, a samo 10% konačno apsorbuju fotoosetljivi receptori [9].

Ljudski vid ima izvanredne sposobnosti, tako da čovek može da primeti i najmanje varijacije u intenzitetu, boji, formi i teksturi, za razliku od mašine koja, svakako, ima svoja ograničenja. Ljudi mogu identifikovati poznata lica u grupi, uprkos velikim promenama u izgledu koje su se desile od trenutka kada su upoznali. Sa druge strane, oni mogu da registruju



dve podudarne slike sa velikom preciznošću. Sposobnost čoveka da analizira složene scene se koristi u realizaciji različitih radnih zadataka u industriji, počevši od procesa projektovanja proizvoda, proizvodnje, mašinske obrade, završne obrade, montaže i kontrole kvaliteta do konačnog pakovanja, i radnji kao što su detekcija, ocena, klasifikacija, itd. Sve ove aktivnosti omogućavaju dobijanje informacija na osnovu kojih se vrši određeno zaključivanje i donošenje odluka, na primer, koji proizvod ne odgovara zadatim zahtevima, detekcija nedostataka, klasifikacija proizvoda, itd.

Međutim, ljudski vid ima i svoja ograničenja, koja utiču na navedeni krajnji ishod, odnosno zaključivanje i donošenje odluka. Jedno od velikih ograničenja je to što ljudsko oko može da registruje samo svetlost iz vidljivog dela elektromagnetnog spektra, talasne dužine od oko 400-780 nm jer, zbog sadržaja proteina, rožnjača i sočivo apsorbiraju ultraljubičastu svetlost, dok zbog sadržaja vode, nije moguće propuštanje infracrvene svetlosti [9]. Dalje, ograničenja čoveka jesu i subjektivnost i pouzdanost. Jedan od uzroka subjektivnosti, ne uzimajući u obzir ograničenja oka (kratkovidost, dalekovidost, bolesti oka, itd.) može biti različito doživljavanje okruženja i posmatranog predmeta. Tako, može se desiti da dve osobe klasifikuju isti predmet drugačije ili da opišu određenu boju na drugačiji način – na primer crvena i tamno crvena, kao i da prilikom ocene rastojanja do objekta daju dve različite ocene. Svakako da na subjektivnost, a posledično i na pouzdanost utiče i trenutno psiho-fizičko stanje čoveka, odnosno zamor, pospanost, nelagodnost, bolest, konzumiranje alkohola ili opojnih sredstava. Takođe, okruženje u kome se čovek nalazi može značajno uticati na vid, obradu informacija, a kasnije i donošenje odluka. Na primer, izloženost čoveka veoma visokim i niskim temperaturama vazduha, vlažnost vazduha, toksična atmosfera, postojanje dima, prašine i izduvnih gasova, biološke opasnosti, opasnost od eksplozije, visok nivo buke, gama i X-zraci, itd. mogu značajno smanjiti pouzdanost čovekovih radnji. Posledica svega ovoga je ideja o postojanju sistema, odnosno mašine koja ima mogućnost da „vidi” i radi, čak i u uslovima u kojima čovek ne može ili su njegove mogućnosti za ispravan i pouzdan rad smanjene.

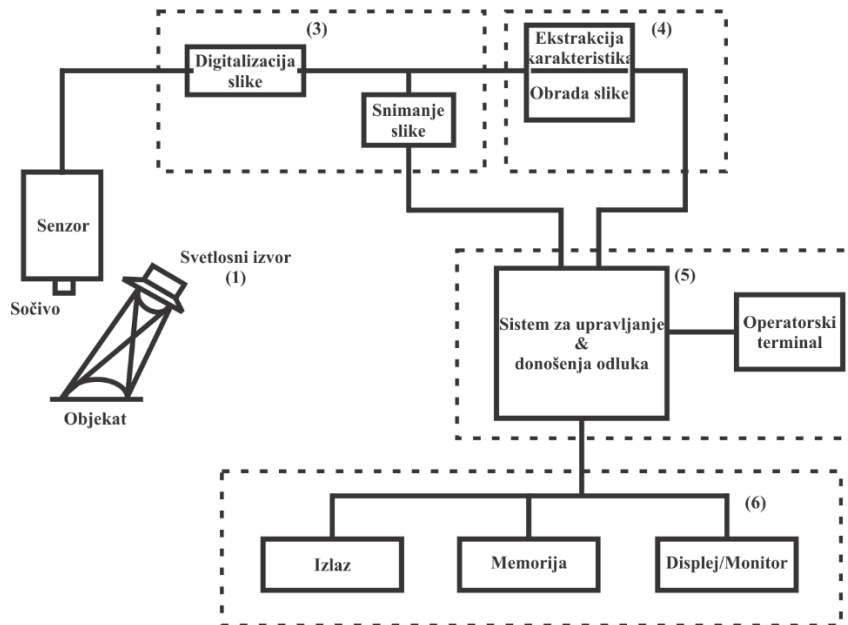
Mašinska vizija je definisana od strane Udruženja mašinske vizije Društva inženjera proizvodnje (eng. *Machine Vision Association of the Society of Manufacturing Engineers*) i Udruženja Automated Imaging Association, kao upotreba uređaja za optičko, bezkontaktno opažanje u cilju automatizovanog primanja i obrade slike stvarne scene kako bi se dobile informacije i/ili upravljalo mašinama ili procesom [10]. Početak mašinske vizije se vezuje za kompaniju Electronic Sorting Machines (tada u Nju Džersiju, SAD), koja je 1930-ih godina



počela sa proizvodnjom mašine za sortiranje hrane, čiji je rad bio zasnovan na posebnim filterima i fotopojčivačima, kao detektorima [10]. Zatim je kompanija RCA, Camden operation, SAD, je 40-tih godina prošlog veka projektovala i proizvela mašinu za inspekciju praznih boca u cilju određivanja koja je boca čista pre početka procesa punjenja. Oblast mašinske vizije je nastavila sa razvojem, posebno kada su računari uvedeni u proizvodni proces. Podaci pokazuju da su najraniji patenti u vezi prepoznavanja znakova (karaktera) objavljeni početkom 1950-ih godina. Prepoznavanje znakova je prikazano upotrebom aparature bazirane na televizoru i računaru 1960-im godinama, a u ranim 1970-im kompanija General Electric je predstavila CID kameru od 32×32 piksela a zatim i rezolucije 100×100 piksela, Bell Labs je razvio koncept povezivanja naelektrisanja i kreirao CCD (engl. *CCD - charge coupled device*) čip, a Reticon je 1971. godine razvio svoj prvi „solid-state” senzor [10]. Godine 1969., u okviru NASA projekta, EMR Photoelectric, kompanija Schlumberger, razvila je optički digitalizator podataka, koji je bio potpuno digitalna kamera, sa mogućnošću selektivne integracije, tako da se može ograničiti digitalizacija samo na oblasti od interesa. Rane verzije kamere prodate su za potrebe merenja na bazi TV interferometrije, optičkih računarskih aplikacija, TV spektrometara, rendgenske digitalizacije i analize kretanja za procenu proteza u biomehanici. Do 1974. godine sistem je korišćen za čitanje znakova na puškama i pregledavanje osigurača [10]. Razvoj solid-state kamera i mikroprocesora je značajno uticao na brži i jeftiniji razvoj mašinske vizije [10], pa je do kraja 1970-ih godina, proizvedeno je više mašina sa sistemima koji su, na neki način, preteča današnje mašinske vizije, kao na primer: kontrola kvaliteta pomfrita, automatizovano spajanje u procesu izrade poluprovodničkih kola, inspekcija silikonskih pločica, optička komparacija, sistem za metalografska ispitivanja i mikroskopske biomedicinske analize, vizuelnu inspekciju proizvoda, itd. [10]. U narednim decenijama, više kompanija je proizvelo i ugradilo sisteme mašinske vizije za različite namene u industriji: sortiranje hrane, sečenje vodenim mlazom, inspekcija lekova u farmaceutskoj industriji, detekcija čestica u rastvoru, inspekcija staklenih posuda, industrija metalnih posuda, inspekcija štampanih ploča, u sistemima za verifikaciju i ocenu LED/LCD panela, čitačima karaktera, sortiranju boja za mokre i suve proizvode, analizatorima kapi, praćenju šava prilikom zavarivanja, analiza čestica u rastvoru, itd. [10]. Zapravo, sistemi mašinske vizije su razvojem tehnologija značajno evoluirali, bazirajući se na osnovnoj ideji o tome kako ljudski vid funkcioniše [10].

Sistem mašinske vizije u svom radu ima šest osnovnih koraka: snimanje slike, digitalizacija, prethodna obrada slike, kompresija i ekstrakcija informacija, donošenje odluke,

postupanje po odluci [11]. U zavisnosti od tehničkog rešenja sistema mašinske vizije, neki koraci mogu biti objedinjeni ili izmenjeni. Funkcionalni blok dijagram osnovnog sistema mašinske vizije je prikazan na slici 2.2.



**Slika 2.2** Funkcionalni blok dijagram osnovnog sistema mašinske vizije [10]

Svetlo (1), koje je emitovano od strane svetlosnog izvora i nalazi se u uzajamnoj interakciji sa objektom, prolazi kroz optički sistem i dolazi do senzora (2) gde se transformiše u električni signal. Ovaj analogni signal, koji je električni napon, se digitalizuje (3), pri čemu neke kamere imaju integrisanu funkciju navedene konverzije. Nakon konverzije, ovakav signal može biti sačuvan kao digitalna slika i kasnije obrađen pomoću računara, odnosno odgovarajućeg softvera. Informacije dobijene na ovaj način su neobrađene pa, pored onih korisnih, odnosno upotrebljivih, sadrže i komponente koje su nepoželjne i nepotrebne, kao na primer: šum, nehomogenost, itd. Zbog toga se vrši obrada slike kako bi se važne informacije odvojile od onih drugih, u skladu sa zadatkom sistema mašinske vizije (4). Na osnovu dobijenih informacija, računar može doneti određenu odluku (5), kao na primer: detektovanje prema različitim kriterijumima (objekta, boje, oblika, defekta, itd.), klasifikacija, obrada, itd., ili proslediti operateru informacije putem terminala ili ekrana, i čekati njegove dalje instrukcije (5). Sistem može sadržati i dodatne komponente (6) – displej za vizuelno posmatranje procesa, dodatnu memoriju, izlazne portove, itd.

Svakako, mašinska vizija se ne može porediti sa sposobnostima ljudskog vida. Još sredinom 1980-ih godina, zaključeno je da očni nerv u ljudskom oku razlaže svaku sliku na oko jedan milion prostornih tačaka (elemenata slike). Mrežnjača funkcioniše kao 1000 slojeva

procesora slike. Svaki sloj izvršava neku akciju sa slikom i prosleđuje je dalje. Pošto oko može da obradi oko 10 slika u sekundi, mrežnjača obrađuje 10000 miliona, odnosno 10 milijardi prostornih tačaka u sekundi po oku [10]. Iako danas postoje veoma savremeni sistemi mašinske vizije, oni još uvek ne poseduju takve sposobnosti kao ljudski vid. U poređenju sa kapacitetima oka i mozga čoveka, trenutni sistemi mašinske vizije su na niskom nivou razvoja u pogledu palete objekata sa kojima mogu raditi, brzine interpretacije i osetljivosti na probleme sa osvetljenjem, i manjih varijacija u teksturi i refleksiji objekata. S druge strane, mašinska vizija ima jasne prednosti u obavljanju višestrukih zadataka ili funkcija, gotovo istovremeno na istom objektu ili istovremeno na različitim objektima. U tabeli 2.1, dato je kratko poređenje ljudskog vida i mašinske vizije, sa napomenom da postoje još karakteristika po kojima se oni mogu porediti.

**Tabela 2.1** Poređenje karakteristika ljudskog vida i mašinske vizije

<i>Ljudski vid</i>	<i>Mašinska vizija</i>
Obrada podataka se vrši paralelno.	Obrada podataka se vrši serijski.
Sav sadržaj sa trenutne scene se dobija istovremeno.	Zbog tehnologije senzora, informacije o sceni se dobijaju jedna po jedna.
Prirodno je trodimenzionalan zahvaljujući ljudskom stereovizijskom sistemu.	Uglavnom radi sa dvodimenzionalnim podacima. Po potrebi, radi i kao stereovizijski sistem.
Zasniva se na interakciji svetlosti i objekta.	Mogući su brojni načini osvetljavanja, a upotrebljeno svetlo je u funkciji aplikacije.
Može funkcionisati samo u vidljivom delu elektromagnetnog spektra.	Može raditi u bilo kom delu elektromagnetnog spektra, u zavisnosti od senzora.

## 2.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Sistemi mašinske vizije danas imaju široku primenu, od jednostavnih do veoma složenih zadataka i sistema, kako u komercijalnim rešenjima, tako i u različitim naučnim poljima i disciplinama. Tako, mašinska vizija nalazi primenu u medicini, vojnim aplikacijama, istraživanju, kontroli kvaliteta, montaži, ispitivanju bez razaranja, prepoznavanju dela lica ili celog lica, različitim oblastima industrije, robotici i mnogim drugim oblastima [4, 12, 13, 14]:

U poslednjim decenijama, posebna pažnja u oblasti transportnih sistema se posvećuje poboljšanju bezbednosnih uslova, optimizaciji eksploatacije transportnih mreža, smanjenju



potrošnje energije, očuvanju životne sredine od zagađenja i povećanju komfora. Razvoj i implementacija sistema mašinske vizije u te sisteme je doprinela daljem razvoju Inteligentnih transportnih sistema i autonomnih vozila.

### **2.1.1. Inteligentni transportni sistemi (ITS)**

Potreba za inteligentnim transportnim sistemima (ITS) se javila pre više decenija, kada se pojavio problem mobilnosti sve većeg broja ljudi i robe, podstičući tražnju za novim alternativnim rešenjima u drumskom saobraćaju. Glavni izazov u upravljanju saobraćajem i transportom je neophodnost brzog dobijanja tačnih i upotrebljivih informacija kako bi se efikasno mogle izvršavati različite odluke i strategije upravljanja. ITS ima za cilj da poboljša bezbednost u saobraćaju, mobilnost, produktivnost i ekonomičnost za sve učesnike u saobraćaju primenom inovativnih tehničkih rešenja u upravljanju tokovima saobraćaja i obezbeđivanjem višeg nivoa bezbednosti i bolje informisanje, kao i koordinisano i „pametno” korišćenje transportnih mreža. Integracijom ITS-a u novu i postojeću putnu mrežu, omogućeno je posedovanje informacija o tokovima drumskog saobraćaja kako bi rizici od potencijalno opasnih situacija bili što je moguće manji. Zbog toga se osnovni zadaci ITS-a, pored ostalog, ogledaju u detekciji vanrednih događaja i obaveštavanju korisnika putne mreže o stanju na putu, i to kroz nadzor putne mreže, prikupljanje podataka, detekciju vozila, pružanje informacija o saobraćajnim gužvama i vremenskim uslovima, merenje brzine vozila, identifikaciju saobraćajnih nezgoda, predviđanje protoka saobraćaja, itd. [15, 16].

Postoje različite vrste senzora koji se koriste za prikupljanje kontinuirano generisanih informacija o tokovima drumskog saobraćaja. Tradicionalni pristupi koriste namenska hardverska rešenja kao što su induktivne detektorske petlje, radarski detektori, laserski detektori, ali glavni nedostaci ovih rešenja su visoki troškovi održavanja i uticaj okoline na njihov rad [16, 17]. Međutim, sistemi za nadzor i detekciju zasnovani na obradi slike koriste kamere, odnosno senzore vizije, i predstavljaju sastavni deo današnjih ITS-a pokazujući velike mogućnosti jer nude veoma fleksibilna rešenja i načine prikupljanja i obrade podataka. Veliku ulogu u povećanju bezbednosti saobraćaja imaju sistemi za detektovanje nepredviđenih vanrednih događaja kao što su prisustvo vozila koje se kreće u suprotnom smeru, vozila koja se sporo kreću ili su zaustavljena, detekcija izgubljenog tereta u saobraćajnoj traci, detekcija dima, odnosno požara, detekcija pešaka na delu puta gde nije dozvoljeno njegovo prisustvo, itd. [18, 19, 20, 21, 22, 23]. Ovi sistemi se zasnivaju na analizi celokupne scene na kojoj je prikazan tok saobraćaja. Neki od algoritama koji se koriste zasnivaju se na detekciji i praćenju pojedinačnih vozila i koriste tehnike kao što su detekcija i praćenje analiziranih objekata na



osnovu modela, određenih regiona ili delova, boja, kontura i karakteristika vozila. Drugi algoritmi koriste posmatranje kretanja u sceni kako bi izmerili srednju brzinu saobraćaja i analizirali promenu tokom vremena za detekciju anomalija [16, 18, 24]. Međutim, uslovi smanjene vidljivosti i loši vremenski uslovi mogu značajno uticati na kvalitet i tačnost detekcije vozila. S obzirom na takve specifične uslove, više različitih metoda je korišćeno za detekciju vozila i to one koje su bazirane na detekciji različitih delova automobila, kao što su farovi, registarske oznake, i dr. [16, 25, 26, 27, 28].

Sa druge strane, u cilju efikasnijeg planiranja i upravljanja putnom infrastrukturom, potrebna je prikupiti određene podatke o saobraćaju, odnosno izvršiti brojanje učesnika u saobraćaju. Za automatsko praćenje koristile su se tehnike zasnovane na video snimcima [18, 29, 30], dok je detekcija vozila pomoću automatskog prepoznavanja registarske oznake korišćena za analizu početka putovanja i odredišta kako bi se izvršila klasifikacija saobraćaja na lokalni, tranzitni, kao i ulazak i izlazak iz saobraćaja u cilju dobijanja makroskopskog intermodalnog modela saobraćaja kao osnova za planiranje u Bavarskoj (Nemačka) [18, 31]. Kao dodatna komponenta brojanju učesnika u saobraćaju, može biti i prepoznavanja stanja saobraćaja (zagušenje, spori tok i gusti saobraćaj), primenom metode optičkog toka [32], korišćenjem geometrijskih karakteristika vozila [33], i dr. Takođe, upotreba senzora vizije je moguća kod sistema adaptivne saobraćajne signalizacije (adaptivni semafori), koji ne vrše funkciju periodično samo na osnovu unapred programiranih faza signalizacije, već uzimaju u obzir i parametre u saobraćajnom toku, kao što su prisustvo vozila, njihov broj i vremenski period zaustavljanja vozila na raskrsnici [34, 23]. Pored toga, kamere se mogu primeniti i kod sistema za snimanje prekršaja i prepoznavanje registarskih oznaka u naseljenim mestima, jer se na osnovu toga mogu sprovesti zakonom propisane sankcije [18], kao i za upravljanje parking prostorima [35]. Takođe, na putevima se mogu koristiti kamere kod sistema za merenje prosečne brzine i naplatu putarine, koji su bazirani na automatskom prepoznavanju registarske oznake vozila prilikom uključanja i isključenja sa autoputa [36, 37].

U Republici Srbiji, celokupan sistem nadzora saobraćaja na autoputevima čini više podsistema [38]. Kod podsistema automatske detekcija saobraćaja (ADS), uz pomoć video-slike sa kamere i detekcijskih kartica beleži se nepredviđeni vanredni događaj (kretanje vozila u suprotnom smeru od dozvoljenog, zaustavljeno vozilo, detekcija dima, detekcija pešaka, saobraćajna nezgoda, itd.), a preko ADS aplikacije na radnoj stanici upozorava se operater na takav događaj i ostalim sistemima prosleđuje alarm za opasnost. Nadzorni upravljački sistem – NUS tunela koji, u slučaju da sistem ADS i upravljač sistema NUS (upozorenje na požar,

otvaranje vrata u niši i prolazima, prevelika koncentracija gasa CO, smanjena vidljivost, upotreba SOS tastera, itd.) uključe značajnije alarme, nadzorni upravljački sistem pokreće algoritam upravljanja promenljivom saobraćajnom signalizacijom (treptuća žuta svetla, LED indikatori i ograničenje brzine). Sistem za video nadzor saobraćaja VNS na alarmnom monitoru prikazuje video-sliku iz kamere koja pokriva područje u kojem je zabeležen alarm, dok se paralelno s tim, alarm upisuje i u bazu podataka na VNS alarmnom serveru i izrađuje snimak događaja za potrebe kasnije analize. Tako operateri imaju neprestani uvid u trenutne uslove na putu i mogućnost ručnog upravljanja pomoću računara bilo kojim uređajem. Sistem nadzora i vođenja saobraćaja – SNVS na PSIS portalima ispred tunela i na trasi autoputa ispisuje odgovarajući natpis o opasnosti i znak za maksimalnu dozvoljenu brzinu. Svi ti sistemi, koji međusobno komuniciraju i razmenjuju podatke o opasnim stanjima, su zaduženi za bezbednost svih učesnika u saobraćaju na autoputu i omogućavaju brzo obaveštavanje operatera o opasnosti. Na taj način su operateri u mogućnosti da vozače pravovremeno upozore na opasnosti koje im prete, i to putem informacionih portala, radio talasa i elektronskih medija, kao i preko saobraćajnih znakova i svetlosnih upozorenja. Operateri, po potrebi sarađuju sa ostalim službama iz oblasti obaveštavanja, policije, hitne pomoći i vatrogasnim službama.

Povezivanje ovih sistema je od ključnog značaja zbog razmene podataka o alarmnom stanju, obaveštavanja operatera i upozoravanja učesnika u saobraćaju o predviđenom (radovi na putu, vanredni transport, radovi na održavanju itd.) ili nepredviđenom (saobraćajna nezgoda, požar, itd.) vanrednom događaju. U sklopu sistema ADS je u te svrhe razvijen namenski programski interfejs TCP za komunikaciju sa sistemima VNS, NUS i SNVS, koji u skladu sa programiranim algoritmima pokreću odgovarajuća stanja i prikaze na podređenim signalno-bezbednosnim uređajima (upravljanje osvetljenjem, ventilacija tunelske cevi, alarmni monitori, semafori, informacioni portali na trasi ispred tunela, itd.), odnosno u skladu sa događajem, moguće je pokrenuti odgovarajući unapred definisan scenario upravljanja saobraćajem [38].

### **2.1.2. Autonomna vozila**

Ideja o razvoju autonomnih drumskih motornih vozila datira još od 1926. godine, kada se automobilom „Linriccan Wonder” upravljalo radio vezom iz drugog automobila, koji je odašiljao radio signale. Ovi signali su putem antene prosleđivani prekidačima koji su upravljali malim elektromotorima, koji su upravljali kretanjem automobila [39]. Tokom godina, mnoštvo različitih sistema je razvijeno i implementirano u vozila, u cilju povećanja nivoa autonomnosti, bezbednosti i komfora istih, a čak su pojedini sistemi postali deo standardne opreme vozila



srednje i visoke klase. Jedno od vozila u koje su integrisani sistemi poput onih za detekciju pešaka, biciklista, vozila, itd., je i vozilo bez vozača čiji je razvoj počeo 2009. godine u okviru projekta kompanije Google. Do marta 2016. godine, prototip ovog vozila je testiran na ukupnom rastojanju od 1498000 milja i, za vreme testiranja, bilo je učesnik u 14 saobraćajnih nezgoda od kojih je 13 izazvano od strane lica koja su upravljala drugim vozilima [40]. Sa druge strane, Udruženje automobilskih inženjera (engl. *The Society of Automotive Engineers (SAE)*) je 2016. godine definisalo 6 nivoa automatizacije motornih vozila i to od nivoa 0 do nivoa 5 [41]. Nivo 0 označava da vozilo ne poseduje sisteme koji obezbeđuju automatizaciju, nivo 1 označava pomoć vozaču kroz sisteme kao što su adaptivni tempomat, sistem protiv blokiranja točkova i sistemi za kontrolu stabilnosti, dok nivo 2 obuhvata dodatne sisteme kao što su sistemi za kočenje u slučaju nužde i izbegavanje sudara. Nivo 3 se odnosi na uslovnu automatizaciju vožnje u ograničenom domenu, odnosno ograničenim delovima puteva, npr. autoput, odnosno da vozač može da vrši druge radnje tokom vožnje, ali da, po potrebi, može da preuzme upravljanje vozilom. Kod vozila koja su na nivoima 4 i 5, čovek nema funkciju vozača. Međutim, nivo četiri se odnosi samo na ograničeni domen, odnosno na puteve gde postoji posebna infrastruktura ili detaljne mape. U slučaju izlaska sa ovih delova puta, vozilo se zaustavlja i vrši automatsko parkiranje. Na nivou pet, vozilo može da vrši funkcije na bilo kojoj putnoj mreži, u svim opsezima brzine kretanja i u bilo kojim vremenskim uslovima, i to vozilo predstavlja potpuno autonomno vozilo. Prema trenutno dostupnim podacima, nijedno serijski proizvedeno vozilo ne poseduje nivo automatizacije 4 ili 5 [41, 42, 43].

Međutim, dostizanje određenog nivoa automatizacije, odnosno autonomnost vozila zavisi od razvoja i implementacije više sistema koji su međusobno povezani a obezbeđuju percepciju okruženja vozila, prikupljanje i obradu informacija, zaključivanje i donošenje odluka, sprovođenje odgovarajućih strategija upravljanja vozilom, itd. Tako, mašinska vizija postaje deo autonomnih vozila i naprednog sistema za pomoć vozaču (engl. *Advanced Driver Assistance System (ADAS)*) koji integriše različite senzore u automobilu u cilju povećanja bezbednosti, efikasnosti i komfora, kroz prikupljanje i obradu različitih informacija, obaveštavanje i pružanje pomoći vozaču u donošenju odluka, ali i sprovođenje određenih radnji u slučaju da vozač nije reagovao, kako bi se sprečila saobraćajna nezgoda (npr. kočenje u slučaju nužde, održavanje rastojanja između vozila, itd. ) [44, 45]. Ovi senzori se mogu grupisati u aktivne i pasivne.

Ultrazvučni senzor je jedan od aktivnih senzora a, s obzirom na nisku cenu i mogućnost merenja manjih rastojanja nezavisno od materijala i boje, princip rada i karakteristike ovih



senzora odgovaraju za primenu kod vozila za pomoć pri parkiranju [46]. Radar (engl. *Radar - Radio Detection and Ranging*) kod vozila, ima radnu frekvencu 24/77/79 GHz [42, 47], a kao deo ADAS, koristi kod sistema koji obaveštavaju vozača o postojanju vozila u tzv. „mrtvom uglu” (engl. *Blind Spot Detection (BSD)*), sistema za pomoć vozaču pri promeni saobraćajne trake (engl. *Lane Change Assistant (LCA)*) i dr. [48, 46]. LiDAR (engl. *LiDAR - Light Detection and Ranging*) se koristi kod drumskih vozila u okviru adaptivnog tempomata (engl. *Adaptive Cruise Control (ACC)*), sistema za identifikaciju i izbegavanje prepreka, detekciju vozila iz okruženja, itd. [46, 49, 50, 51].

Posebnu važnost za autonomnu vožnju predstavlja percepcija okruženja samog vozila, jer čovek vizuelno opaža oko 90% informacija potrebnih za upravljanje vozilom [52]. Senzori vizije spadaju u grupu pasivnih senzora, koji omogućavaju prikupljanje vizualnih informacija iz okruženja bez emitovanja signala, pa zbog toga ne može ometati rad drugih sistema [49]. Kamere su postale sveprisutne u automobilima, od onih koje su namenjene za jednostavne aplikacije poput snimanja saobraćaja, vožnje unazad kao pomoć pri parkiranju, itd., do onih koji su sastavni deo sistema ADAS, a služe za detekciju vozila, adaptivni tempomat, promenu saobraćajne trake, detekciju pešaka, parkiranje, itd. [53, 54, 55]. Jedan od sistema mašinske vizije koji koristi senzor vizije-kameru, a utiče na povećanje bezbednosti ali i komfora je sistem za detekciju i praćenje puta i saobraćajne trake. Ovaj sistem je već sada sastavni deo drumskih vozila, a njegov ključni element je detekcija horizontalne putne signalizacije i širine celog puta [56]. Rad ovog sistema može biti zasnovan na informacijama o intenzitetu, boji, gradijentu i različitim filterima [52, 57, 58, 59] i metodama maksimizacije kontrasta [60], homogeno obojenoj horizontalnoj signalizaciji [61, 62], histogramu [63], modeliranju samih traka kao klotoide [64, 65, 66], parabole [60] i polinomske krive [67], kao i metode bazirane na konturama [68, 69, 70], i rekonstrukcije oznaka na putu kao sekvence pravih linija [71], ali i neuronskoj mreži [72]. Međutim, većina metoda ima ograničenja koja se ogledaju u kompleksnosti i topologiji puta, kao i kvalitetu horizontalne saobraćajne signalizacije.

Saobraćajni znakovi, odnosno vertikalna saobraćajna signalizacija su važan deo putne infrastrukture koji služi za pružanje informacija o trenutnom stanju na putu, ograničenjima, zabranama, upozorenjima i dr. Sistem za detekciju i prepoznavanje vertikalnih saobraćajnih znakova (engl. *Traffic Sign Detection and Recognition-TSDR*) je deo savremenog ADAS sistema, koji omogućava da se eventualna greška ili nepažnja vozača može nadomestiti i time značajno povećati bezbednost i komfor u vožnji [73]. Uopšteno, detekcija vertikalnih saobraćajnih znakova se odnosi na njihovo lociranje u sceni, dok se klasifikacija odnosi na

određivanje vrste znaka [73, 74, 75, 76, 77]. Metode detekcije vertikalnih saobraćajnih znakova se mogu podeliti na metode bazirane na boji, obliku i hibridne metode, koji se zasnivaju na boji i obliku. Metode zasnovane na boji koriste činjenicu da je svaki saobraćajni znak projektovan tako da bude lako uočljiv i sa unapred određenim bojama koje su jasno vidljive. Ove metode poseduju dobru robustnost ali su osetljive na vremenske uslove i uslove lošeg osvetljenja, kao i prisustvo refleksije i stepen oštećenosti boja na znaku [73, 76, 78, 79, 80, 81]. Metode zasnovane na obliku koriste sličan princip, odnosno oblici saobraćajnih znakova su poznati, pa algoritam za detekciju oblika traži konture i vrši njihovu aproksimaciju u sceni, kako bi se donela konačna odluka na osnovu broja detektovanih kontura. Metode koje su korišćene su Hjuova transformacija, detekcija sličnosti, detekcija ivica, Haar-like karakteristike, itd. Ove metode nisu osetljive na promene osvetljenja, ali je njihov glavni nedostatak loša detekcija ili čak i nemogućnost detekcije fizički oštećenih ili delimično zaklonjenih saobraćajnih znakova [73, 78]. Kombinacijom prethodno navedenih metoda su nastale hibridne metode, koje se, između ostalog, zasnivaju na segmentaciji boje, a zatim se detekcija oblika implementira i primenjuje se samo na segmentirane regione [73, 82, 83]. Neki od klasifikatora koji su upotrebi su podudaranje šablona (engl. *Template Matching*), genetski algoritam, neuronska mreža, AdaBoost klasifikator, itd. [73, 80, 84].

Smatra se da su umor, smanjena budnost a time i pospanost vozača uzročnici čak do 30% saobraćajnih nezgoda, posebno tokom vožnje u noćnim uslovima [85]. Svrha sistema za otkrivanje pospanosti jeste da detektuje pospanost u ranoj fazi i vrši upozorenja sa sredstvima za uzbunu vozača, a ne da utiče na to da vozač bude budan. Metode funkcionisanja ovih sistema se mogu grupisati u tri kategorije [56]: metode koje analiziraju trenutno vozačevo stanje, odnosno psihološko stanje povezano sa pospanošću - detekcija kretanja očnih kapaka i glave, pogleda i drugih izraza lica, detekcija procenta otvorenosti očiju, perioda treptanja, itd., upotrebom kamera; bihevioralne metode zasnovane na ponašanju vozača - ponašanje vozila, uključujući položaj i kretanje, ubrzanje, usporenje, promena stepena prenosa, pritiska papučice u određenim vremenskim intervalima, itd.; metode zasnovane na kombinaciji trenutnog stanja i performansi vozača.

Pravovremena detekcija drugih učesnika u saobraćaju (vozila, pešaka i biciklista), kao i objekata koji predstavljaju prepreke, mogu značajno uticati na bezbedno odvijanje saobraćaja. Metode zasnovane na znanju funkcionišu na osnovu pretpostavke poznavanja određenih parametara objekta (vozila) koji se detektuje (položaj vozila, oblik, boja, tekstura, senka, osvetljenje, itd.). Simetrija se može koristiti kao jedna od najvažnijih karakteristika vozila.



Svako vozilo je skoro u potpunosti simetrično gledano i sa prednje i zadnje strane i to se koristi u algoritmima za detekciju vozila [56]. Jedan od problema koji se javlja prilikom upotrebe simetrije je postojanje homogenih područja pa je, u ovim oblastima, procena simetrije osetljiva na šum [86]. Pored simetrije, u detekciji vozila mogu se koristiti i boje, pa objekti (vozila) koji se kreću mogu biti segmentirani od pozadine (puta) [87]. Ostale metode zasnovane na znanju koriste, senku vozila, uglove, vertikalne/horizontalne ivice, branika, prozora, zatim teksturu, farove vozila, itd., pod pretpostavkom da postojanje određenog parametra ili dela vozila u sceni, vodi zaključku da se i vozilo nalazi u datoj sceni [56, 86, 88, 89, 90]. U stereovizijskim sistemima uglavnom se koriste dve kamere, mada je u [91] korišćen i sistem sa tri kamere za detekciju objekata veličine do oko 15cm na rastojanjima do 100m, ali se pokazalo da je cena takvog sistema relativno visoka. Tako je u radu [92], predstavljen sistem stereo vizije sa dve kamere koji je instaliran na ARGO vozilu sa zadatkom da se detektuju i prate vozila na osnovu monokularne sekvence slike; za grubu estimaciju udaljenosti vozila koristi se monokularna kamera, dok se stereo vizija koristi za preciznije određivanje rastojanja. Princip stereo vizije je korišćen i u okviru projekta UTA (engl. *Urban Traffic Assistant-UTA*), čiji je jedan od ciljeva bio i zaustavljanje i kretanje vozila u centralnim gradskim jezgrima grada koristeći stereo viziju i dobijanje 3D informacija u realnom vremenu, i to detekcijom saobraćajnih znakova, semafora i pešaka, kao i saobraćajnih traka, i pešačkih prelaza [93]. Metode zasnovane na pokretu koriste optički tok za obradu slike. Jednom kada se izračuna optički tok manjih delova slika, mogu se prepoznati kandidati pokretnih objekata (vozila). Način verifikacije odlučuje o tome koji će se kandidati smatrati stvarnim objektima. Provera se vrši kalibracijom praga brzine na najefikasniju vrednost. Ovim filtriranjem se smanjuju greške u detekciji. Za dalju verifikaciju koriste se metode koje se takođe koriste u metodama detekcije vozila zasnovanih na znanju [56, 90]. Pored toga, mogu se koristiti i druge metode za detekciju više vozila poput kombinacije Haas, HOG (engl. *Histogram of Oriented Gradients-HOG*) SVM (engl. *Support Vector Machine-SVM*) za ekstrakciju karakteristika ciljnog vozila, i kaskadnog struktuiranog AdaBoost klasifikatora [94], ali i metode koje uključuju veštačku inteligenciju [95, 96].

Pešak je, pored bicikliste, jedan od učesnika u saobraćaju koji je najviše izložen opasnosti, kako u urbanim, tako i u ruralnim sredinama. Ako sa stanovišta detekcije pešake gledamo kao objekte, njihova detekcija predstavlja veliki izazov zbog različitih dimenzija, boja i okruženja. Zbog toga se može desiti da se pešak ne može detektovati jer se „stopio” sa okolinom, npr. boja garderobe je ista ili slična boji okruženja – npr. građevinskog objekta pored kog se nalazi, zatim oblik i dimenzije su se promenile zbog toga što nosi neki objekat, npr.



torbu, ranac, kesu, itd., ili pak je zauzeo položaj tela koji nije pogodan za detekciju. Poseban problem predstavlja nepredvidivost kretanja pešaka, jer se pravac kretanja može promeniti veoma brzo, a takođe se mogu naći i pored parkiranih vozila ili drugih objekta, pa je pravovremena detekcija praktično nemoguća. Takođe, pešaci moraju biti detektovani u vrlo dinamičnim scenama, jer se u većini slučajeva kreću i pešak i sistem za detekciju, kao i u različitim uslovima osvetljenja i vremenskim uslovima. Najčešći pristup detekciji pešaka je segmentacija scene, pa se na osnovu toga određuje da li se pešak nalazi u sceni ili ne [52, 59]. Za potrebe određivanja kandidata za detekciju, konturne karakteristike u hijerarhijskom pristupu podudaranja šablona su korišćene u [97], a morfološke karakteristike (veličina, odnos i oblik) i vertikalna simetrija oblika čoveka za istu namenu korišćena je u [98]. Pored toga, metode bazirane na stereo viziji su razmatrane u literaturi, pa je u radu [65] predstavljen jedan od prvih stereo algoritama posebno razvijenih za ADAS. Klasifikacija lokalne strukture koja rešava nejasnoće korišćenjem histograma dispariteta, koristi se za izvođenje stereo korespondencije, dok je kasnije taj algoritam proširen multirezolucijskom metodom sa tačnošću subpiksela [93, 99]. Dalje, u radu [100], je predstavljen sistem, koji koristi stereo kamere i podudaranje uzorka i kretanje za detekciju pešaka. Pored toga, metode koje integrišu stereo viziju i neuronske mreže su korišćene za detekciju pešaka, u okviru čega je urađena segmentacija zasnovana na stereo viziji, a zatim je upotrebljena prethodno trenirana neuronska mreža za prepoznavanje pešaka [101, 102]. Za detekciju pešaka se može koristiti i omnidirekciona kamera koja služi za dobijanje „panoramskog pogleda”, koji se može primeniti u navigaciji, lokalizaciji i mapiranju [40], međutim kvalitet prikupljenih podataka zavisi od veličine distorzije. Takođe, moguće je koristiti kamere za događaje (engl. *Event Camera*), koje počinju sa radom kada dođe do promene u trenutnoj sceni. Glavni nedostatak ovih kamera je veličina piksela i rezolucija slike [42]. Ipak, jedan od faktora koji značajno utiče na rad sistema baziranih na viziji kao i na tačnost detekcije objekata je to što je njihov rad ograničen na vidljivi deo elektromagnetnog spektra. U uslovima lošeg i promenljivog osvetljenja, kao i u lošim vremenskim uslovima (prisustvo senki, magle, kiše ili snega, noćni uslovi), primena ovih sistema za detekciju objekta praktično nije moguća, jer može doći do izostanka detekcije objekta ili čak i do lažne detekcije.

Fuzijom aktivnih i pasivnih senzora mogu se upotpuniti prednosti i mane različitih senzora i time pobošljati robustnost i preciznost sistema. Za potrebe detekcije vozila i pešaka, može se raditi fuzija različitih senzora: Radara i kamere, LiDAR-a i stereo kamere, pa čak i LiDAR-a i Radara [46, 49, 103, 104, 105, 106]. Najveći nedostaci ovih sistema su rad na malim





rastojanjima od objekta i mogućnost multipliciranja greške detekcije. Međutim, kako bi zadovoljio složene zahteve autonomne vožnje, a prema Izveštaju objavljenom 2018. godine, najnoviji prototip vozila kompanije Waymo poseduje četiri grupe sistema: LIDAR, sistem vizije, Radar i grupu dodatnih senzora (GPS, audio senzore koji prepoznaju zvukove vozila hitnih službi, itd.) i projektovan je da poseduje nivo 4 automatizacije. Zadatak ovog višeslojnog senzorskog paketa je formiranje detaljne 3D slike okruženja uz prikazivanje dinamičkih i statičkih objekata uključujući pešake, bicikliste, druga vozila, saobraćajnu signalizaciju, građevinske objekte i druge karakteristike puta [107].

### 2.1.3. Železnica

Železnički saobraćaj predstavlja veoma bitnu komponentu u svakodnevnom transportu putnika i robe. Razvoj autonomnih sistema, koji će značajno povećati bezbednost, efikasnost i kapacitet železničkog saobraćaja, uz smanjenje troškova, je jedan od glavnih ciljeva moderne železnice. Još 1967. godine je puštena u rad prva linija podzemnog metroa, Victoria line, u Londonu koja je posedovala ATO, iako je vozač bio prisutan u kabini, a 1981. godine je počela sa radom potpuno automatizovana linija metroa u Japanu [108].

Autonomno upravljanje železničkim vozilom je nemoguće bez sistema za detekciju prepreka, koji se, prema mestu na kome su montirani, mogu razmatrati kao oni koji se nalaze na železničkoj infrastrukturi (koloseku, pružnom prelazu, itd.) i stacionarni su, i oni koji se nalaze na vučnom vozilu i, samim tim, su pokretni. Stacionarni sistemi su pogodni za upotrebu na konfliktnim tačkama, odnosno na mestima na kojima se ukrštaju tokovi železničkog i drumskog saobraćaja u nivou koloseka. Jedna grupa stacionarnih sistema za detekciju prepreka na pružnim prelazima u nivou koloseka se zasniva na optičkim principima, odnosno objekat se detektuje kada prođe određeni deo pružnog prelaza [109]. U ovu grupu spadaju sistemi sa optičkim snopom i ultrazvučnim sensorima. Prednosti ovih sistema su jednostavna instalacija i relativno jeftina oprema, međutim nedostaci se ogledaju u neophodnosti postavljanja nekoliko sistema na pružnom prelazu radi veće bezbednosti, zaustavljanje saobraćaja radi instalacije i održavanja, sistem može uključiti lažne alarme u toku loših vremenskih uslova i nije moguća detekcija pešaka bez velikog broja sistema [110]. Detekcija prepreka na pružnim prelazima se može vršiti i upotrebom nagibnog 2D LiDAR-a mernog opsega od 0,5 – 20m i moguće je detektovati objekte dimenzija minimalno 10x10x10 cm [111]. Sistem sa 3D laser radarom skenira pružni prelaz u dva pravca – horizontalni i vertikalni, i na osnovu refleksije laserskog zraka dobijaju se 3D koordinate svake tačke oblasti. Tačke koje su u međusobnoj blizini se grupišu i to ukazuje na postojanje objekta, koji se, na osnovu unapred definisanih uslova,

klasifikuje kao prepreka ili ne. Rad ovog sistema je nezavistan od vremenskih uslova, ali njegova tačnost zavisi od uslova sredine jer, zbog rotacije samog uređaja u toku rada, vibracije mogu značajno uticati na tačnost [112]. U radu [113], četiri LiDAR-a su montirana na uglovima pružnog prelaza, kako bi se vršila detekcija, pešaka, bicikla i automobila. Međutim, prilikom detekcije, javilo se nekoliko problema, kao što su nemogućnost potpune detekcije crnih automobila, tačnost detekcije zavisi od materijala i boje objekta, teškoće prilikom detekcije providnih i tamnih objekata, kao i onih sa visokom reflektivnošću, itd.

Sistemi za detekciju prepreka na pružnim prelazima mogu biti zasnovani i na viziji, čije se prednosti u odnosu na sisteme bazirane na optičkim principa ogledaju u potrebi za manjim brojem senzora, mogućnostima određivanja vrste objekta, itd. Sistem sa jednom kamerom je postavljen u uglu pružnog prelaza, a detekcija objekta je zasnovana na razlici trenutne i pozadinske slike [110]. Sa druge strane, stereovizijski sistem prikazan u radu [114] poseduje dve kamere koje služe za detekciju i lokalizaciju bilo koje vrste objekata na pružnom prelazu, pri čemu se, na osnovu lokacije objekta, određuje da li je neka situacija bezbednosno opasna ili ne. Pored toga, stereovizijski sistem sa dva podsistema sa po dve kamere je postavljen na pružnom prelazu kako bi detektovao vozila, pešake i dvotočkaše kada je pružni prelaz otvoren i zatvoren za drumski saobraćaj [115]. Ovi sistemi nisu pokazali zadovoljavajuće rezultate pri lošim vremenskim uslovima i promenljivim uslovima osvetljenja.

Svakako, prisustvo objekta i na drugim delovima železničke infrastrukture može dovesti do saobraćajne nezgode, često i sa tragičnim posledicama, pa je njihova detekcija od velike važnosti. Za potrebe detekcije prepreka na delu koloseka, mogu se koristiti infracrveni senzori, pri čemu je definisana jedna oblast na koloseku i dve oblasti van koloseka, pa je u svakoj oblasti postavljen po jedan IC senzor na međusobnom rastojanju od 25cm [116]. Pored toga, mogu se koristiti infracrveni i ultrazvučni senzori koji aktiviraju alarm usled prisustva nekog objekta, a nalaze se u zonama pored koloseka [117]. Oba sistema mogu da detektuju objekte koji su dimenzija minimalno 50x50x50 cm, međutim, problem se javlja sa lažnim alarmima koji su posledica loših vremenskih uslova (kiša, sneg i magla) i direktnih sunčevih zraka, pa je u [117] predložena fuzija podataka, zasnovano na fazi logici i Dempster-Shafer teoriji dokaza, kako bi se validiralo postojanje objekata. Sa druge strane, primena više kamera postavljenih na železničkoj stanici, u cilju detekcije objekata je prikazana u radu [118]. Dve vrste opasnih scenarija su definisane - prisustvo objekta (podrazumeva pad pešaka na kolosek) i intenzivna promena osvetljenja (podrazumeva pojavu požara), kroz četiri koraka detekcije: detekcija voza, detekcija objekta, prepoznavanje objekta i praćenje objekta. Kako bi se

prevazišli nedostaci različitih senzora, u radu [119] je prikazan sistem sa kamerom i infracrvenim i ultrazvučnim sensorima koji je postavljen u blizini železničkih mostova u cilju detekcije prepreka i to tako što su infracrveni i ultrazvučni senzori postavljeni tako da emiteri i prijemnici budu sa obe strane koloseka a kamera bude iznad koloseka. Pored toga, za uslove smanjene vidljivosti, tehnologija kompanije FLIR primenom infracrvene kamere može detektovati aktivnosti, kao što su blokirani pružni prelazi i prisustvo ljudi, na delovima železničke infrastrukture, u cilju sprečavanje eventualne saobraćajne nezgode [23].

Komercijalna rešenja kompanije Fokus Tech vrše detekciju prepreka na pružnim prelazima i u opasnim zonama primenom 3D laserskog skenera SALVIS. U oba slučaja, ako se detektuju prepreke, vrši se upozoravanje pratećih sistema železničke infrastrukture i voz koji se približava nadgledanoj zoni, biće zaustavljen. Oba sistema mogu da rade u otežanim uslovima okoline (prašina, vibracije, visoka temperatura, sneg, kiša) [120].

Iako je upotreba stacionarnih sistema, koji se nalaze na železničkoj infrastrukturi, lakša sa stanovišta promene uslova sredine i kalibracije samih senzora, postavljanje ovih sistema duž cele železničke infrastrukture nije moguće zbog održivosti samog sistema. Druga mogućnost je postavljanje sistema za detekciju prepreka na vučno železničko vozilo, pa se u literaturi mogu naći tri vrste sistema: aktivni, pasivni i mešoviti sistemi.

Osnovna ideja koncepta aktivnog sistema sa infracrvenim sensorima, prikazanog u radu [121], je postavljanje senzora na čeonom delu vučnog vozila-lokomotive, odakle se snop emituje i reflektuje od objekta i, u zavisnosti od ugla pod kojim se reflektuje, može se odrediti rastojanje od senzora do objekta i obavestiti mašinovođu o postojanju prepreke na koloseku. Primena jedne CCD kamere za detekciju prepreka ispred vučnog vozila u dnevnim i noćnim uslovima, zasnovana na detekciji koloseka Hjuovom transformacijom i analizi regiona prekida kontinuiteta detektovanog koloseka, je prikazana u radu [122]. Takođe, primena Hjuove transformacije za detekciju koloseka i prepreka, a zatim i primena metode optičkog toka za detekciju mogućih prepreka i njihove putanje je prikazana u radu [123]. Mogućnosti analize neposrednih opasnosti na pružnim prelazima korišćenjem kamere na vučnom vozilu su prikazane u radu [124]. Video snimci sa kamere za nadzor u vučnom vozilu su korišćeni za razvoj sistema za detekciju i lokalizaciju vozila na prelazima u cilju prikupljanja informacija za kasnije analize, za detekciju je korišćen klasifikator baziran na histogramu orijentisanih gradijenata (engl. *Histograms of Oriented Gradients-HOG*). Koncept sistema sa tri kamere za detekciju prepreka na električnim vodovima, u cilju prevencije oštećenja pantografa, je prikazan u radu [125].

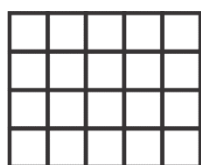


Fuzija tri kamere i infracrvenog senzora korišćena je za detekciju objekata na koloseku, pri čemu je maksimalna moguća površina objekta  $0.4 \text{ m}^2$  do rastojanja od 250m, sa kombinacijom nekoliko algoritama zasnovanih na rastojanju između šina, karakteristikama ivica, varijacija intenziteta sive, itd. [126]. Mutlisenzorski sistem koji sadrži dve kamere i dva radara, montiran na železničko vozilo, je prikazan u radu [127]. Podaci dobijeni sa senzora se kombinuju pomoću inteligentne metode fuzije zasnovane na Kalmanovom filteru i određuju se granice koloseka, a dobijaju se precizne procene stanja (položaja i brzine) detektovanih objekata ispred vozila. Takođe, sistem sa kamerom, LiDAR-om, i radarom je korišćen za detekciju prepreka na koloseku, ali samo na malim i srednjim rastojanjima, odnosno do 400m [128]. U radu [129], korišćeni su kamera i radar za detektovanje prepeka kao što su automobili, bicikli i ljudi na koloseku na rastojanjima do 100 metara. Sistem se nalazi na lokomotivi, u kućištu čijim položajem može da se upravljanja pomoću računara, kako bi područje ispred lokomotive uvek bilo prikazano u trenutnoj sceni. Sistem sa stereo kamerama, jednom kamerom i tri senzora- infracrveni, radar i ultrazvučni, je korišćen za detekciju prepreka između šina minimalnih dimenzija  $0,3 \times 0,3 \times 0,3 \text{ m}$  na opsegu rastojanja od 10 – 80 m, sa tačnošću od 1 m [130]. Sa druge strane, konceptualno rešenje sistema sa tri kamere, koje formiraju dva stereovizijska podsistema, i LiDAR-om je uspešno testirano kao deo sistema za detekciju prepreka na koloseku na rastojanjima od 50m i 100m [131]. Kompanija Kappa je razvila komercijalni sistem sa kamerama koje se koristi kao pomoć u aktivnosti manevrisanja kod teretnog železničkog saobraćaja [132]. Sa druge strane, kompanija Bombardier je prezentovala juna 2019. godine sistem za praćenje i prevenciju sudara i prekoračenja brzine za tramvaje – COMPAS. Prevencija prekomerne brzine zasnovana je na viziji, bazirana na digitalnim podacima o koloseku i vizuelnoj odometriji, sprečava vozilo da prekorači unapred definisana ograničenja brzine. Automatizovani sistem za pomoć pri detekciji prepreka sa kamerama i integrisanim regulatorom daje vozaču signal upozorenja, a u vanrednim okolnostima impuls kočenja. COMPAS je projektovan tako da vozač uvek održava potpunu kontrolu nad vozilom, zasnovan je na Bombardierovom sistemu pomoći za otkrivanje prepreka (ODAS) koji je kompanija počela razvijati još 2014. godine, a u toku 2016. i 2017. godine je integrisan u 74 tramvaja [133], [134]. Prvi potpuno autonomni voz sa tri lokomotive u vlasništvu kompanije Rio Tinto, je pušten u rad 10. jula 2018. godine, prevozeći 28000 tona rude na rastojanju od 280 km između rudnika Tom Price i luke Cape Lambert u Australiji, a nadgledan je iz operativnog centra Rio Tinto u Pertu, udaljenom više od 1500km [135].

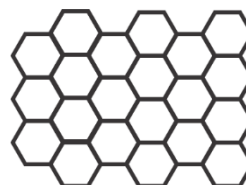
## 2.2. Digitalna slika

U mašinskoj viziji sve počinje sa slikom koja sadrži informacije o trenutnoj sceni. Snimanje (akvizicija) slike digitalnom kamerom predstavlja prvi korak koji zavisi od osvetljenja, jer bilo kakvi nedostaci u originalnoj slici mogu uzrokovati velike probleme sa kasnijom analizom slike i njenom interpretacijom. Očigledan primer je nedostatak detalja na slici, zbog npr. nedovoljnog kontrasta ili lošeg fokusiranja kamere. Posledica ovoga može biti nedovoljno jasna slika, odnosno dimenzije objekta sa slike nisu tačne, objekat nije prepoznatljiv i dr., pa svrha mašinske vizije nije ispunjena. Količina i kvalitet informacija koje su sadržane u slici, u potpunosti zavise od procesa akvizicije slike, odnosno od senzora koji se koristi, postojanja svetlosti u sceni, osvetljenja, uslova okruženja u kome se vrši akvizicija slike, itd. Informaciju koja nije dobijena u toku ovog procesa, veoma je teško naknadno dobiti, ali je to najčešće i nemoguće ili čak informacija dobijena na takav način nije upotrebljiva.

Dvodimenzionalna slika je rezultat perspektivne projekcije trodimenzionalne scene na ravan [136]. Dakle, monohromatska slika se može predstaviti neprekidnom (kontinualnom) funkcijom dve promenljive  $f(x,y)$  gde su  $(x,y)$  koordinate u dvodimenzionalnom neprekidnom prostoru (ravni), a vrednost funkcije  $f$  za bilo koji uređen par  $(x,y)$  jeste osvetljenost slike u toj tački. U slučaju slike u boji,  $f$  je vektor, gde svaki element ukazuje na osvetljenost slike u tački  $(x,y)$  u odgovarajućem opsegu boja. Međutim, za potrebe obrade pomoću računara, slika mora biti digitalna, odnosno sve vrednosti  $x$ ,  $y$  i  $f$  moraju biti konačne i diskretne, i mora biti predstavljena pomoću odgovarajuće diskretne strukture podataka, na primer matrice. Digitalizacija slike obuhvata operacije odmeravanja (engl. *sampling*) i kvantizacije. U operaciji odmeravanja, neprekidna funkcija slike  $f(x,y)$  se odmerava korišćenjem tačaka odmeravanja koje su poređane u dvodimenzionalnom diskretnom prostoru (ravni). Geometrijski odnos tih tačaka se naziva mreža i ona je diskretnog tipa. Mreže koje se obično upotrebljavaju u praksi su pravougaone ili šestougaone (Slika 2.3). Dakle, na ovaj način se može dobiti slika koja je zapravo matrica sa  $M$  vrsta i  $N$  kolona [136, 137, 138].



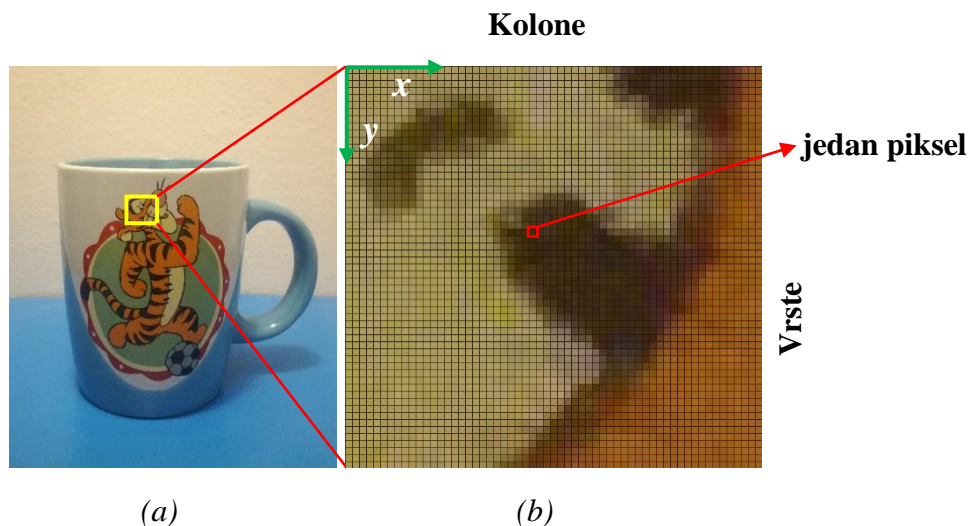
(a)



(b)

**Slika 2.3** Pravougaona (a) i šestougaona mreža (b) [136]

Jedna beskonačno mala tačka odmeravanja u mreži, odnosno presek vrste i kolone u matrici, korespondira jednom elementu digitalne slike nazvanom piksel (engl. *pixel*), što je prikazano na slici 2.4, odnosno kod trodimenzionalne slike je nazvan voksel (zapreminski element). Mera odmeravanja određuje koliko će piksela digitalna slika imati, odnosno određuje rezoluciju slike.

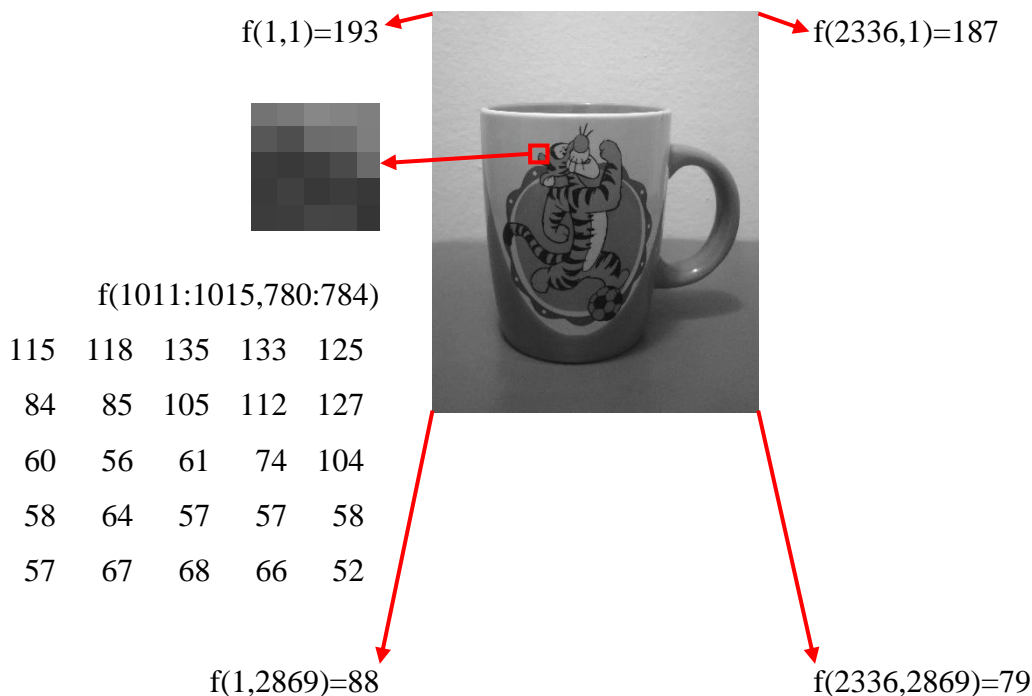


**Slika 2.4** Digitalna slika (a), vrste, kolone i piksel (b)

Pored toga, u procesu digitalizacije slike, vrši se prelaz između kontinualne vrednosti funkcije slike, odnosno osvetljenosti (engl. *brightness*) u njen digitalni ekvivalent, odnosno intenzitet (engl. *intensity*), i taj postupak se naziva kvantizacija. Prema tome, kvantizacijom se određuje koliko će nivoa intenziteta biti upotrebljeno da se predstavi vrednost osvetljenosti svake tačke odmeravanja, odnosno svakom pikselu se dodeljuje celobrojna vrednost koja predstavlja nivo intenziteta, tj. intenzitet, a odgovara nivou osvetljenosti [136]. Razlika između osvetljenosti i intenziteta je što osvetljenost jeste „subjektivni osećaj” posmatrača (da li je neki deo slike svetliji ili tamniji), dok intenzitet predstavlja celobrojnu vrednost koja opisuje nivo osvetljenosti određenog piksela.

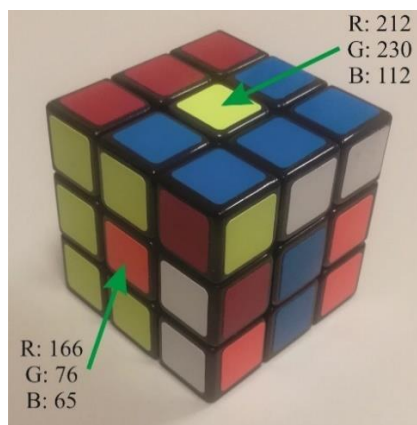
Dakle, digitalna slika jeste digitalna reprezentacija dvodimenzionalne slike koja se sastoji od konačnog broja skupova digitalnih vrednosti koji se nazivaju pikseli i koji su organizovani matrično, sa konačnim brojem vrsta i kolona. Piksel u digitalnoj slici predstavlja individualni nedeljivi element konačnih dimenzija, definisan dvema koordinatama koje jednoznačno određuju njegovu lokaciju u odnosu na koordinatni sistem slike i koji sadrži digitalne podatke o intenzitetu osnovnih boja u datoj tački. Koordinatni početak se najčešće nalazi u gornjem levom uglu digitalne slike, kao što je prikazano na slici 2.4. Ovakav izbor koordinatnog sistema slike je korišćen i u ostalim poglavljima ove disertacije.

Jedna od klasifikacija deli digitalne slike na binarne, sive (engl. *grayscale*) i multispektralne slike. Kod binarnih slika vrednost intenziteta u svakom pikselu se kvantuje brojevima 0 i 1, gde 0 predstavlja crno, a 1 belo, pa je potreban jedan bit memorije. Sive slike imaju više nivoa intenziteta (nivoa sive, nijansi sive), što znači da je svakom pikselu pridružena jedna brojna vrednost intenziteta iz konačnog skupa. To znači da 8-bitna grayscale slika ima 256 različitih nivoa intenziteta iz opsega  $[0,255]$ , jer je  $2^8=256$ , pri čemu se vrednost 0 uzima kao crna, a 255 kao bela, dok vrednosti između predstavljaju različite nivoe intenziteta. Na slici 2.5 je prikazana grayscale slika rezolucije 2336x2869, što znači da ima 2336 kolona i 2869 vrsta. Svaki piksel ima svoju lokaciju koja je jednoznačno određena i odnosu na koordinatni sistem slike i nivo intenziteta u opsegu od 0 do 255. Tako, piksel  $f(1,1)=193$  ima lokaciju u prvoj koloni i prvoj vrsti i njegov nivo intenziteta je 193, dok piksel  $f(2336,2869)=79$  ima lokaciju u 2336-oj koloni i 2869-oj vrsti i njegov nivo intenziteta je 79. Crvenim kvadratom je označen region slike od 5x5 piksela koji je izdvojen, a lokacije piksela su  $f(1011:1015,780:784)$ , pri čemu su kolone od 1011 do 1015 a vrste od 780 do 784. Nivoi intenziteta ovih piksela su dati na slici, pa se može videti da piksel na lokaciji  $f(1013,780)$  ima najveći intenzitet od 135 (treća kolona i prva vrsta), dok piksel sa lokacijom  $f(1015, 784)$  ima najmanji intenzitet od 52 (peta kolona i peta vrsta).



**Slika 2.5** Siva slika sa lokacijama piksela i nivoima intenziteta

Multispektralne slike imaju više od jedne lokalne osobine definisane u svakoj tački, pa zahtevaju više memorije. Na primer, kod slika u boji, svaki piksel ima tri intenziteta – po jedan za crvenu, zelenu i plavu, ako je u pitanju RGB (R-red, G-green, B-blue) prostor boja (Slika 2.6). Ove tri vrednosti predstavljaju intenzitet svetlosti u različitim spektralnim opsezima koje ljudsko oko vidi kao različite boje.



Slika 2.6. Intenziteti piksela u RGB prostoru boja

### 2.3. Akvizicija digitalne slike

Primena digitalnih slika počinje još 1920-ih godina u novinskoj industriji, kada se, pomoću sistema *Bartlane cable picture transmission system*, podmorskim kablom vršio prenos digitalne slike između Londona i Njujorka. Na ovaj način se vreme za dobijanje slike preko Atlantskog okeana smanjilo sa više od nedelju dana, koliko je bilo potrebno dopremiti sliku brodom, na manje od tri sata. Specijalizovana oprema za štampanje kodirala je slike za prenos preko kabla, a zatim ih rekonstruisala na prijemu. Jedna od prvih digitalnih slika koja je tako prenesena, je „proizvedena” 1921. godine iz kodirane trake telegrafskim štampačem sa specijalnim oblicima (Slika 2.7). Kvalitet slike je bio relativno nizak, sa samo 5 nivoa intenziteta (nivoa sive), da bi 1929. godine, slike imale 15 nivoa intenziteta [138].



Slika 2.7 Jedna od prvih digitalnih slika [138]

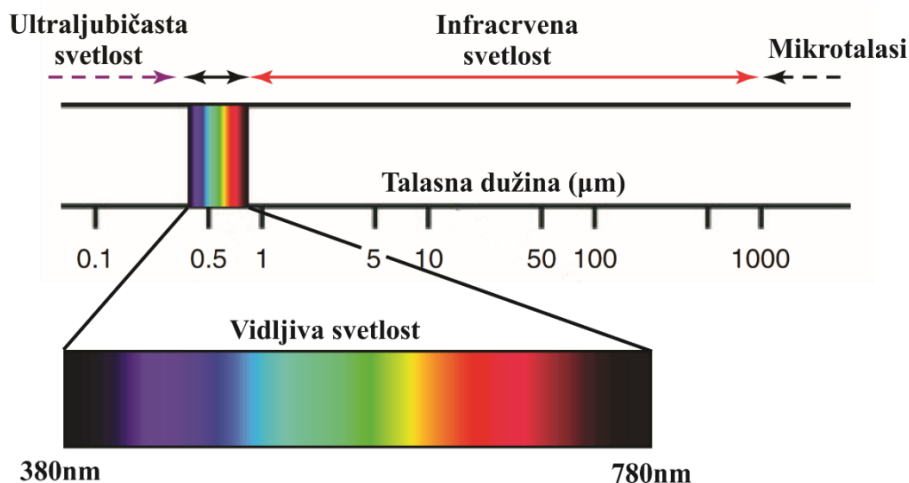


Svetlost, odnosno njena priroda je veoma bitan element u procesu akvizicije slike, i fizički može biti opisana kao talas ili čestica. U zavisnosti od konkretnog fizičkog scenarija o kojem je reč, jedan ili drugi opis može biti korisniji za opisivanje posmatranog efekta. Oba opisa svetlosti su legitimna, ali nijedan ne objašnjava sve uočene pojave, tako da se svetlost u zavisnosti od potrebe može posmatrati kao talas ili čestica, pa se to često naziva dualitet talas-čestica. U modelu čestica, svetlost se sastoji od fotona (kvanta svetlosti). U vakuumu, ove čestice svetlosti bez mase se kreću ravnim putanjama sa konstantnom brzinom od 300000 km/s. Materija može apsorbovati fotone i njihovu energiju; obrnuto, energija se može emitovati u obliku svetlosti. Efekat koji se može objasniti samo modelom čestica je kvantizacija: za fiksnu talasnu dužinu postoji minimalna količina energije ispod koje svetlost određene talasne dužine ne može pasti. Ta količina odgovara energiji jednog fotona [11].

Model elektromagnetnih talasa opisuje vidljivu, ali i nevidljivu svetlost, kao talas koji se širi u prostoru. Talas je opisan svojom talasnom dužinom  $\lambda$  ili, svojom frekvencijom  $\nu$ . Prostorna periodičnost jeste talasna dužina  $\lambda$ , dok se prolazna periodičnost naziva periodom oscilovanja  $T$ , a njena recipročna vrednost je frekvencija  $\nu = 1/T$ . Talasna dužina i period oscilovanja povezani su brzinom širenja talasa  $c$ , što zavisi od specifične vrste talasa [11, 139]:

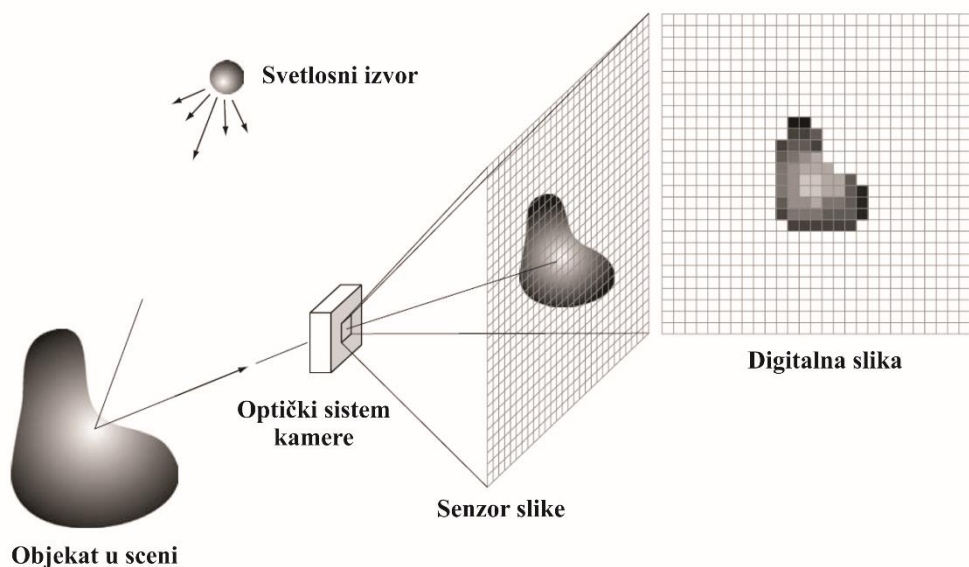
$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

U elektromagnetnom spektru, za čoveka vidljiva svetlost zauzima manji deo, talasna dužina te svetlosti je u opsegu od 380 nm do 780 nm (0,38  $\mu\text{m}$  do 0,78  $\mu\text{m}$ ), dok je talasna dužina infracrvene svetlosti u opsegu od 780 nm do 1 mm, a ultraljubičaste od 15 nm do 380 nm (Slika 2.8) [139]. U vidljivom delu, spektar boja je podeljen u šest širokih opsega: ljubičasta, plava, zelena, žuta, narandžasta i crvena. Nijedna boja (ili druga komponenta elektromagnetnog spektra) se naglo ne završava, već se svaki opseg glatko stapa sa sledećim [138].



*Slika 2.8 Deo elektromagnetnog spektra zračenja – opseg vidljive svetlosti [138, 139]*

Kod digitalnih kamera, akvizicija slike počinje tako što svetlo, koje je emitovano od strane svetlosnog izvora, dolazi u interakciju sa objektom koji se nalazi u trenutnoj „fizičkoj” sceni (Slika 2.9). Svetlost koja se odbije od objekta, prolazi kroz optički sistem kamere i dolazi na senzor slike (kod starijih kamera koje nisu digitalne, svetlost osvetljava fotoosetljivi film). Posle izvesnog vremena (vreme ekspozicije), mehaničkim zatvaračem se sprečava dalji prolazak svetlosti, ili se podaci o slici očitavaju sa senzora veoma brzo, tako da nema potrebe za upotrebom mehaničkog zatvarača. Kada svetlost dođe na senzor, transformiše se u električni signal, odnosno električni napon, a zatim se digitalizuje na prethodno opisan način. Tako digitalizovan signal se čuva kao digitalna slika. Ako se snimi serija slika, ovaj niz se naziva video i sastoji se od više uzastopnih frejmova, odnosno slika. Pored samih objekata iz scene, slika može sadržati i šum koji predstavlja slučajnu i neželjenu varijaciju osvetljenja ili boje na slici.



*Slika 2.9 Akvizicija digitalne slike [138]*

Vreme ekspozicije, kao jedan od radnih parametara kamere, utiče na osvetljenost slike, jer duže vreme ekspozicije omogućava da više svetla dođe do senzora, pa će slika biti svetlija. Za akviziciju slike je bitna i veličina blende, a to je prečnik otvora kroz koji svetlost putuje do senzora dok je zatvarač otvoren. U uslovima slabog osvetljenja, poželjna je veća veličina blende, kako bi što veća količina svetlosti došlo do senzora, dok u uslovima jakog osvetljenja, manja veličina blende bi omogućila prolaz manje količine svetlosti, kako slika ne bi bila previše svetla. Još jedan parametar važan za akviziciju slike je i osetljivost senzora na svetlost, koji predstavlja minimalnu količinu svetlosti koja je potrebna da bi senzor uočio razliku od potpunog mraka. U uslovima slabog osvetljenja, standardni senzori daju tamnije slike, pa se radi pojačanje osvetljenosti slike, što utiče i na pojačanje šuma na slici [140].

Većina današnjih digitalnih kamera poseduje CCD ili CMOS poluprovodničke fotoosetljive senzore. CCD senzor sadrži veliki broj fotoosetljivih elemenata, odnosno fotodioda. Kada svetlost padne na fotodiodu, ona skladišti određenu količinu naelektrisanja koja je generisana apsorbiranim fotonima. Prema tome, količina naelektrisanja je proporcionalna „osvetljenju”, odnosno intenzitetu piksela. Ova faza se naziva faza akumulacije. U sledećoj fazi, koja se naziva faza očitavanja, pojačavač, koji se postavlja u jedan ugao senzora, očitava i pojačava naelektrisanja uzastopno, jedno po jedno, počevši od najbližeg, da bi se konačno konvertovala u električni napon. Sa druge strane, i CMOS (engl. *CMOS - Complementary metal-oxide-semiconductor*) senzori sadrže fotodiode, ali svaki pojedinačni piksel ima svoj pojačavač, odnosno tranzistor. Rezultirajući signal na svakoj lokaciji piksela se očitava pojedinačno. Korišćenje tranzistora ima za posledicu manji broj fotodioda na površini senzora, a time i manju osetljivost na svetlost. Ovaj problem je rešen tako što se ispred svake diode postavlja mikrosočivo koje fokusira svetlost na fotodiodu, kako ne bi ta svetlost pala na tranzistor i time bila neiskorišćena. CCD senzori su manje skloni šumu i osetljiviji su na svetlost. Sa druge strane CMOS sensorima treba manje energije za rad i jeftiniji su za proizvodnju [8, 141].

Jedan od načina za dobijanje digitalne slike u boji (RGB slike) je postavljanjem filtera preko senzora koji nemaju mogućnost detektovanja boja, već samo intenziteta svetlosti. Ti filteri propuštaju crveni, zeleni ili plavi deo spektra svetlosti do površine senzora. Filteri se vrte ispred svakog pojedinačnog piksela pa se registruje jedna po jedna boja. Tako se dobijaju tri odvojene slike u tri boje, odnosno kamera snima sve tri komponente boje za svaki piksel pojedinačno, a zatim se boja dobija naknadnom rekonstrukcijom registrovanog intenziteta van samog senzora. Podrazumeva se da se, tokom procesa akvizicije slike, objekat neće pomerati.

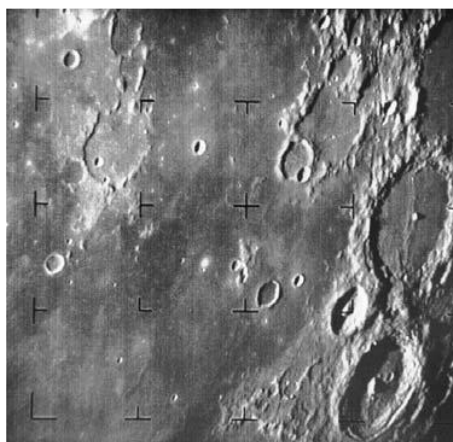
Drugi način je korišćenje tri odvojena senzora sa tri filtera, pri čemu svaki senzor registruje boju u skladu sa odabranim filterom. Za razdvajanje svetlosti na osnovne boje, koristi se prizma koja usmerava svetlost na senzore. Na taj način, kamera snima svaku od tri boje na svakom pikselu. Još jedan način je korišćenje filtera koji su integrisani u sam senzor, tako što svaki piksel, u slučaju RGB prostora boja, može imati samo jednu boju. Kod RGB senzora, postupak nastajanja boja se može zasnivati na npr. Bajerovom obrascu, koji sadrži 50% zelenih, 25% crvenih i 25% plavih ćelija, jer se smatra da je ljudsko oko najosetljivije na zelenu boju. Na takav način se kreira mozaik boja koji nastaje kao rezultat korišćenog filtera, pa je potrebno iz tog mozaika rekonstruisati boju koja odgovara stvarnoj boji. Taj proces se naziva demosaiking (engl. *demosaicing*), odnosno interpolacijom se vrši određivanje komponente boje koja nedostaje na svakom pikselu, pa tako jednostavne metode interpoliraju komponente boje od susednih piksela, dok druge metode pokušavaju da identifikuju ivice sa visokim kontrastom i samo interpoliraju duž tih ivica, ali ne i preko njih [8, 140].

## 2.4. Obrada i analiza slike

Digitalna obrada slike potiče od potrebe da se vrši poboljšanje informacija sa slike zarad ljudskog razumevanja i obrada podataka sa slike, u cilju čuvanja, prenosa i korišćenja u mašinskoj, kompjuterskoj ili robotskoj viziji. Analiza i obrada slike se može vršiti u prostornom ili frekventnom domenu [140]. U prostornom domenu, sve operacije se vrše nad pikselima slike koje su direktno dobijene akvizicijom, odnosno vrše se operacije nad matricama koje predstavljaju sliku ili se dodaju filteri u vidu maski matrica [140]. U frekventnom domenu, tehnike obrade slike se zasnivaju na operacijama nad Furijeovom transformacijom slike (najčešće crno-bele slike), gde frekvence predstavljaju količinu promene nijanse sive (intenziteta boje) u zavisnosti od rastojanja [140]. Visoke frekvence karakterišu velike promene u nijansama sive na malim rastojanjima i najčešće odgovaraju ivicama i šumu, dok niske frekvence karakterišu male promene nijansi sive i odgovaraju pozadini ili teksturi površina. Pri obradi slike u frekventnom domenu, jako često se primenjuju filteri visoke frekvence (engl. *High pass filter*) koji uklanjaju niskofrekventne komponente i filteri niske frekvence (engl. *Low pass filter*) koji propuštaju komponente niske frekvence i eliminišu komponente visoke frekvence [140].

Digitalna obrada slika (engl. *Digital Image Processing*) se obično odnosi na obradu (procesiranje) digitalnih slika upotrebom digitalnih računara. Još 1964. godine je računar upotrebljen za potrebe ispravljanja izobličenja slike Meseca (kao posledica korišćenja tadašnjih

kamera) koje je poslala svemirska sonda Ranger 7 (Slika 2.10), na kojoj su markeri korišćeni za korekciju slike, pa se to smatra počecima digitalne obrade slika.



**Slika 2.10** Slika Meseca koju je poslala svemirska sonda Ranger 7 [138]

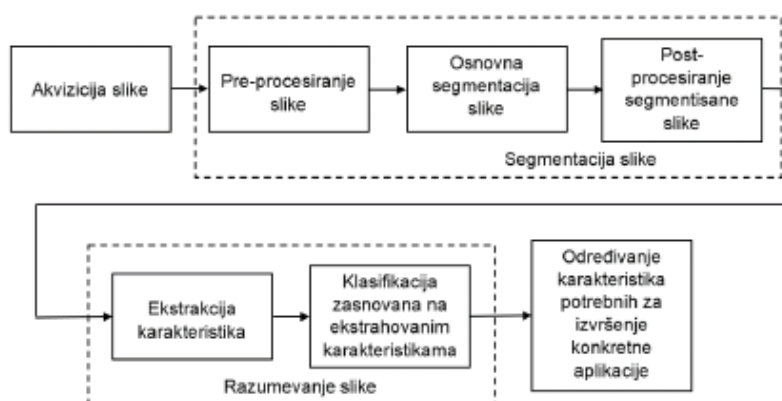
Razvojem računara, otvaraju se mogućnosti za digitalnu obradu slika i u ostalim oblastima, pa 1970-ih godina počinje da se koristi u medicini. Tih godina dolazi i do otkrića kompjuterizovane tomografije (engl. *computerized tomography (CT)*), radiološke metode za snimanje koja pored rendgen zračenja primenjuje i matematičke procedure za obradu snimka, koji je jedan od najvažnijih događaja u primeni obrade slika u medicinskoj dijagnostici [138].

Digitalna obrada slike obuhvata određene matematičke operacije u cilju izvršenja konverzije ulazne promenljive, koja predstavlja sliku, niz slika, fotografiju ili video snimak, u izlaznu promenljivu, koja može biti slika ili niz karakteristika i/ili parametara koji su vezani za sliku. Digitalna obrada slike u osnovi ima tri koraka: obradu slike na niskom, srednjem i visokom nivou procesiranja i analize slike [138]. Obrada slike na niskom nivou obuhvata operacije, kao što su predprocesiranje (predobrada) uklanjanje šumova, podešavanje kontrasta, izoštravanje slike, itd. Karakteristika ovog koraka je da su slike i na ulazu i na izlazu iz procesa. Obrada slike na srednjem nivou se bavi morfološkim karakteristikama slike, kao što su segmentacija koja podrazumeva deljenje slike na regione ili objekte, opis tih objekata da bi se sveli na oblik pogodan za računarsku obradu i klasifikaciju (prepoznavanje) pojedinih objekata. Ovaj korak karakteriše to što je na ulazu slika a na izlazu su atributi ekstrahovani iz date slike, kao npr. ivice, konture, određeni objekti. Konačno, obrada na višem nivou, uključuje „smislenost” celine prepoznatih objekata, kao što je analiza slike, i obuhvata primenu raznih metoda kako bi se iz slike, koja je podešena prema prethodnim koracima, izvukli određeni zaključci [8, 138, 141, 142].

Kvalitet slike dobijene akvizicijom jako zavisi od uslova pod kojim je slika dobijena. Zbog toga se, u zavisnosti od specifične primene, može raditi poboljšanje slike kako bi se



promenile neke njene karakteristike (promena kontrasta, korišćenje različitih filtera, itd.). Takođe, može se vršiti i restauracija slike koja podrazumeva estimaciju originalne slike, i vrši se uklanjanje ili smanjivanje degradacija od strane senzora ili okoline, geometrijskih izobličenja, lošeg fokusa, itd. Pобољшanje slike je subjektivno, jer zavisi od ocene posmatrača, dok je restauracija objektivna, jer se koristi u slučajevima kada je degradacija slike poznata ili kada može da se formira model degradacije. Međutim, za potrebe smanjenja potrebnog prostora za skladištenje slike ili njenog prenosa, koriste se različite tehnike kompresije. Neke tehnike kompresije slike se odnose na reprezentaciju slike bez ikakvog gubitka informacija, gde je stepen kompresije relativno nizak, dok se kompresijom slike drugim metodama gube određene informacije sa slike, ali je stepen kompresije visok. Morfološka obrada slike se odnosi na primenu alata koji ekstrahuju delove slike koji su korisni za reprezentaciju. Uopšte gledano, za sve napred navedene korake u obradi slike, i na ulazu u proces i na njegovom izlazu se dobija slika [143]. Metode segmentacije dele sliku na njene sastavne delove sa ciljem da pojednostavi ili promeni reprezentaciju slike, radi lakše analize slike. Rezultat segmentacije slike skup segmenata (regiona, ivica, itd.) u kojima pikseli dele određene karakteristike, a zapravo ti segmenti zajedno čine celokupnu sliku. Reprezentacija i deskripcija (opis) slike su faze koje gotovo uvek prate izlaz iz faze segmentacije, kako bi se podaci konvertovali u pogodnu formu, a odgovarajućom deskripcijom podataka omogućava se ekstrakovanje karakteristika koje su od interesa. Faza deskripcije se još naziva i selekcija karakteristika ili selekcija atributa (engl. *feature selection*) i na izlazu iz ove faze se dobijaju kvantitativne informacije od interesa ili se, na osnovu tih informacija, vrši razlikovanje jedne klase objekta od druge [143]. Pravilan izbor i upotreba tehnika segmentacije i ekstrakovanja omogućava visok nivo razumevanja slike jer, nakon ekstrakovanja karakteristika sa slike, dolazi faza prepoznavanja i zaključivanja. U ovoj fazi se, prethodno ekstrahovane karakteristike, mogu porediti sa već razvijenim standardima ili obrascima, da bi se, kao izlaz, dobila druga vrsta informacija i doneli određeni zaključci (na primer postojanje objekta, klasifikacija objekta, merenje objekta, itd.), ili pak sprovođenje određenih upravljačkih radnji.



**Slika 2.11** Blok dijagram sa određenim fazama u obradi i analizi slike [140]

Danas, digitalna obrada i analiza slike ima veoma široku primenu u oblastima mašinske vizije, robotike, kompjuterske vizije, astronomije, medicine, biomedicine, vojske, geografije, saobraćaja, umetnosti, itd. Potrebe za tehnikama digitalne obrade slike su različite: dijagnostika, kontrola kvaliteta, automatska vizuelna kontrola procesa, sigurnosni nadzor, detekcija kvarova, detekcija i praćenje objekata, i njihova klasifikacija, restauracija oštećenih slika, dodavanje specijalnih efekata, manipulacija satelitski dobijenih snimaka, detekcija vozila, ocena rastojanja, povećanje bezbednosti u saobraćaju, itd. [8, 138, 142].

#### 2.4.1. Ujednačavanje histograma

Histogram digitalne sive (grayscale) slike je grafik koji predstavlja relativnu učestanost pojavljivanja različitih vrednosti nivoa intenziteta (nivoa sive) u slici. Za digitalnu sliku sa nivoima intenziteta u opsegu  $[0, L-1]$ , histogram je diskretna funkcija  $p(r_k) = n_k/N$ , gde je  $r_k$   $k$ -ti nivo intenziteta, a  $n_k$  je broj piksela u slici sa tim nivoom intenziteta, pri čemu je  $k=0, 1, \dots, L-1$ , a  $N$  ukupan broj piksela slike [8]. Drugačije rečeno,  $p(r_k)$  je procena verovatnoće pojave nivoa intenziteta  $r_k$  u slici, pa se zbog toga histogram može razmatrati i kao metoda statističkog opisa slike. Zbir svih komponenti normalizovanog histograma jednak je 1 [138]. To znači da se za jednostavnu sivu (grayscale) sliku, histogram može konstruisati određivanjem broja puta kada se na slici pojavi svaki nivo intenziteta (0–255) [144].

Histogram daje primarno globalni opis slike. Kod tamnih slika, nivoi intenziteta su grupisani bliže koordinatnom početku, dok su kod svetlih grupisani dosta daleko od koordinatnog početka grafika [140]. Sa druge strane, ako je histogram slike uzak, to znači da je slika slabo vidljiva jer je razlika u nivoima intenziteta na slici uglavnom mala. Histogram gde su nivoi intenziteta raspoređeni duž celog opsega ukazuje na to da su na slici prisutni gotovo svi nivoi intenziteta i na taj način se povećava ukupni kontrast i vidljivost. Oblik

histograma slike otkriva važne informacije o kontrastu, pa je osnova za određene tehnike obrade slike u prostornom domenu koje se koriste za poboljšanje slike [8, 138].

U slučaju kada je histogram slike uzak, to znači da su na slici, u većoj meri, prisutni samo određeni nivoi intenziteta, što značajno utiče na jasnoću i vidljivost svih elemenata na slici. Tada se koristi tehnika poboljšanja slike - ujednačavanje histograma (engl. *Histogram Equalization*). Ovom tehnikom, poznata kao i ekvilizacija histograma, se vrši automatsko „širenje” histograma slike duž celog opsega i time postiže poboljšanje slike u smislu kontrasta i jasnoće, a posmatrač vidi „izoštrenu” sliku [140, 143]. Ujednačavanje histograma se sastoji od prilagođavanja nivoa intenziteta u slici tako da se nivoi intenziteta sa histograma ulazne slike preslikavaju na ujednačeni histogram. Neka promenljiva  $r$  predstavlja slučajnu promenljivu koja označava nivo intenziteta u slici. U početku možemo pretpostaviti da je  $r$  neprekidna i nalazi se u zatvorenom intervalu  $[0:1]$ , pri čemu  $r = 0$  predstavlja potpuno crnu, a  $r = 1$  potpuno belu. Za bilo koje  $r$  u navedenom intervalu, razmotrimo transformaciju forme [8]:

$$s = T(r) \quad (2)$$

Transformacija daje nivo intenziteta  $s$  za svaku vrednost intenziteta piksela  $r$  u originalnoj slici. Pretpostavlja se da transformacija  $T$  zadovoljava sledeće uslove [8]:

- $T(r)$  je jedinstvena funkcija koja monotono raste u intervalu  $[0:1]$ ;
- $T(r)$  je funkcija koja se nalazi između 0 i 1.

Prvi uslov obezbeđuje redosled nivoa intenziteta u slici, počevši od crne pa do bele. Drugi uslov se odnosi na to da je funkcija u skladu sa dozvoljenim opsegom vrednosti intenziteta piksela. Inverzna transformacija iz  $s$  u  $r$  može biti predstavljena na sledeći način [8]:

$$r = T^{-1}(s). \quad (3)$$

Neka originalni i transformisani nivoi intenziteta budu određeni funkcijama gustine verovatnoće  $p_r(r)$  i  $p_s(s)$ , redom. Na osnovu teorije verovatnoće, ako su  $p_r(r)$  i  $p_s(s)$  poznate i ako  $T^{-1}(s)$  zadovoljava prvi uslov, onda je funkcija gustine verovatnoće transformisanih nivoa intenziteta data na sledeći način [8]:

$$P_s(s) = \left[ P_r(r) \frac{dr}{ds} \right]_{r=T^{-1}(s)}. \quad (4)$$

Ako je transformacija data u sledećem obliku [8]:

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(\omega) d\omega \quad (5)$$



onda se zamenom  $\frac{dr}{ds} = \frac{1}{P_r(r)}$  u jednačinu (4), dobija  $P(s)=1$ . Tako je moguće transformacijom opisanom jednačinom (5), dobiti jednolično raspodeljeni histogram slike. Iz napred navedenog, jasno je da upotreba funkcije transformacije koja je jednaka kumulativnoj raspodeli  $r$  (kao što je dato jednačinom (5)) formira sliku čiji nivoi intenziteta imaju jednoliku gustinu. Ovo implicira da takva transformacija rezultira povećanjem dinamičkog opsega vrednosti intenziteta piksela, što utiče na poboljšani izgled slike. Jednostavan algoritam ujednačavanja histograma je dat kroz sledeće korake [8]:

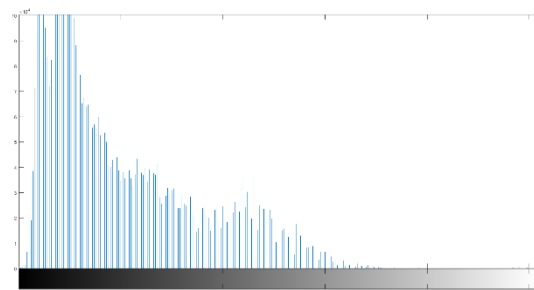
- za svaki piksel slike, uzima se vrednost nivoa intenziteta (nivoa sive) kao promenljivu  $i$ ,  $hist[i]=hist[i]+1$ , gde je  $i=0$  za  $L-1$ , za  $L$  nivoa intenziteta slike.
- iz histograma, uzima se kumulativna frekvenca histograma  $hist_{cf}[i]= hist_{cf}[i-1] + hist[i]$ .
- generiše se ujednačeni histogram kao:

$$eqhist[i] = \left\lfloor \frac{[L * hist_{cf}[i] - N^2]}{N^2} \right\rfloor \quad (6)$$

- gde  $L$  predstavlja broj nivoa intenziteta u slici,  $N^2$  je broj piksela u  $N \times N$  slici,  $[x]$  je zaokruživanje  $x$  do najbližeg celog broja.
- zamenjuje se vrednost nivoa intenziteta  $i$  vrednošću  $eqhist[i]$  za svako  $i$ .



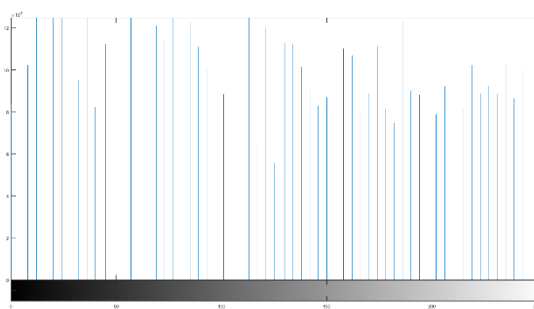
(a)



(b)



(c)



(d)

**Slika 2.12** Ujednačavanje histograma: originalna slika (a), histogram originalne slike (b), poboljšana slika (c), ujednačeni histogram (d)

Na slici 2.12 je prikazano da je histogram originalne slike (b) uzak i neujednačen zbog toga što su se nivoi intenziteta grupisali bliže koordinatnom početku, pa je originalna slika (a) relativno tamna i ne mogu se prepoznati svi detalji. Nakon ujednačavanja histograma (d), nivoi intenziteta su raspoređeni duž celog opsega, a poboljšana slika (c) ima bolji kontrast i mogu se prepoznati detalji. Visine u histogramu odgovaraju broju piksela za svaki nivo intenziteta.

#### 2.4.2. Segmentacija

Osnovni cilj segmentacije je pojednostavljenje slike time što će se cela slika podeliti na njene sastavne delove odnosno regione, kako bi se izdvojili elementi bitni za konkretnu aplikaciju i uklonili nebitni detalji sa slike. Segmentacija uključuje podelu slike u skup homogenih i smislenih regiona, tako da pikseli u svakom regionu poseduju identičan skup svojstava ili atributa, odnosno dele istu specifičnu vizuelnu karakteristiku. Ovi skupovi svojstava slike mogu da sadrže nivo sive boje, kontrast, spektralne vrednosti ili teksturna svojstva. Rezultat segmentacije je niz homogenih regiona od kojih svaki ima jedinstvenu oznaku (labelu). Slika je tako definisana skupom regiona koji su povezani i bez preklapanja, tako da svaki piksel na slici dobije jedinstvenu oznaku koja označava region kojem pripada. Grupisanjem piksela sa istom labelom, može se dobiti objekat od interesa na slici, što može poslužiti u kasnijoj analizi, na primer za klasifikaciju. Nivo detalja do kog se vrši podela, odnosno segmentacija, zavisi od konkretnog problema koji se rešava [8, 11, 138, 140].

Neka  $R$  predstavlja celu prostornu oblast koju zauzima slika. Segmentaciju možemo posmatrati kao proces koji oblast  $R$  deli na konačan broj regiona  $R_i$  ( $i=1,2,\dots,n$  su nesrazmerni neprazni skupovi) koji se međusobno ne preklapaju, tako da su zadovoljeni sledeći uslovi [138]:

1.  $\bigcup_{i=1}^n R_i = R$ .
2.  $R_i$  je povezan skup,  $i=1,2,\dots,n$ .
3.  $R_i \cap R_j = \emptyset$  za sve vrednosti  $i$  i  $j$ ,  $i \neq j$ .
4.  $Q(R_i)=TAČNO$  za  $i=1,2,\dots,n$ .
5.  $Q(R_i \cup R_j)=NETAČNO$  za bilo koje susedne regione  $R_i$  i  $R_j$ .

Tako,  $Q(R_k)$  jeste logički predikat definisan nad tačkama u skupu  $R_k$ , a  $\emptyset$  je prazan skup. Simboli  $\cup$  i  $\cap$  predstavljaju uniju i presek skupova. Dva regiona  $R_i$  i  $R_j$  su susedna ako njihova unija formira povezan skup. Uslov (1) ukazuje na to da segmentacija mora da bude kompletna, odnosno svaki piksel mora biti u oblasti  $R$  i biti segmentiran. Uslov (2) ističe da pikseli u istom segmentiranom regionu treba da budu povezani. Uslov (3) ukazuje na to da regioni moraju biti razdvojeni, odnosno da se ne smeju međusobno preklapati, a uslov (4) se

odnosi na to da pikseli koji pripadaju istom segmentiranom regionu moraju imati iste osobine, na primer,  $Q(R_i)=TAČNO$  ako svi pikseli u regionu  $R_i$  imaju isti intenzitet. Na kraju, uslov (5) pokazuje da dva susedna regiona  $R_i$  i  $R_j$  moraju biti različita u smislu predikta  $Q$ . Uopšte gledano,  $Q$  može biti i složen izraz, kao što je, na primer  $Q(R_i)=TAČNO$  ako je prosečni nivo intenziteta piksela u  $R_i$  manji od  $m_i$ , i ako je standardna devijacija njihovog intenziteta veća od  $\sigma_i$ , gde su  $m_i$  i  $\sigma_i$  specifične konstante [138].

Segmentacija predstavlja jedan od najtežih zadataka u procesu obrade slike, jer tačnost segmentacije određuje stepen uspešnosti u daljoj analizi slike. Većina algoritama za segmentaciju grayscale slika se zasniva na dve osnovne osobine nivoa intenziteta piksela [138]: sličnost i diskontinuitet, pa se na osnovu toga i dele u dve kategorije. U prvu kategoriju (sličnost), spadaju algoritmi koji se zasnivaju na podeli slike na regione koji su slični prema skupu unapred definisanih kriterijuma. Takvi algoritmi su u grupi metoda segmentacije zasnovanih na regionu (engl. *Region-based segmentation*) i to su metode zasnovane na pragu (engl. *Thresholding*), rastu regiona (engl. *Region growing*), podeli i spajanju regiona (engl. *Region splitting and merging*), itd. [138]. Kod algoritama koji se zasnivaju na diskontinuitetu, polazi se od pretpostavke da su granice regiona dovoljno različite jedna od druge i od pozadine, pa je time omogućeno detektovanje granica na osnovu lokalnih naglih promena intenziteta. Glavna područja interesa ove kategorije su otkrivanje linija i ivica na slici. Prema tome, ako možemo da izdvojimo ivice na slici i povežemo ih, tada je region opisan obodom, odnosno ivicom koji je sadrži [8]. Takvi algoritmi spadaju u grupu metoda segmentacije zasnovanih na ivicama (engl. *Edge-based segmentation*), odnosno metode detekcije ivica.

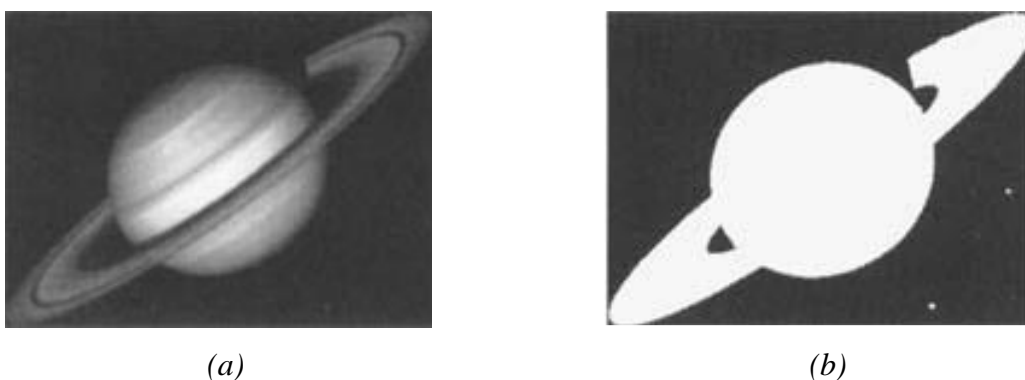
#### 2.4.2.1. Segmentacija zasnovana na pragu

Jedan od najvažnijih problema kod sistema vizije je identifikacija regiona na slici koji predstavljaju objekte u sceni. Iako je ova operacija prirodna i relativno laka za ljude, to baš i nije slučaj za računare. Segmentacija na osnovu praga predstavlja grupu metoda zasnovanih na poređenju vrednosti nivoa intenziteta piksela slike sa određenim pragom, čime se može vršiti izdvajanje objekta od pozadine.

Kod sive (grayscale) slike, u postupku segmentacije sa jednim pragom, vrši se konverzija ulazne slike  $f(x,y)$  u binarnu sliku  $g(x,y)$ , tako što se vrednost nivoa intenziteta svakog piksela  $(x,y)$  poredi sa zadatim pragom  $T$ , tako da važi [138, 136]:

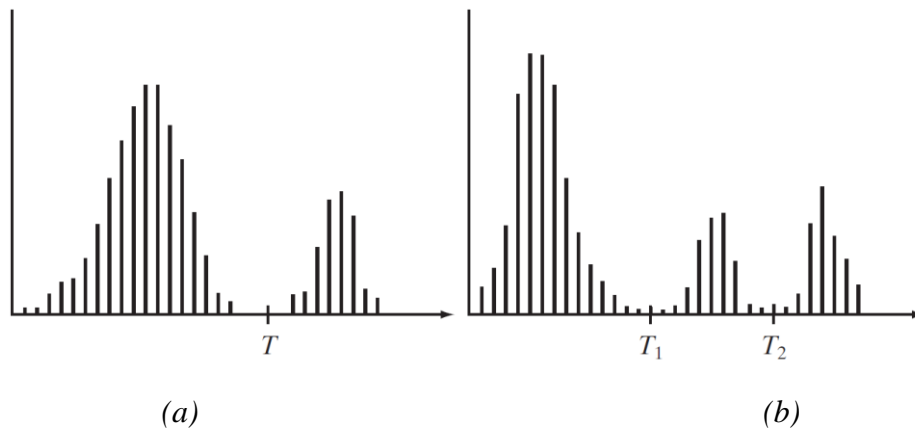
$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } f(x,y) > T \\ 0, & \text{ako je } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (7)$$

Ako je vrednost nivoa intenziteta veća od praga  $T$ , u binarnoj slici se pikselu dodeljuje vrednost 1, dok u suprotnom slučaju, pikselu se dodeljuje vrednost 0. U binarnoj slici, pikseli sa vrednošću 1 formiraju jedan region, a pikseli sa vrednošću 0 formiraju drugi region. Naravno, u zavisnosti od potrebe, može se definisati i drugačija raspodela. Na primer, za sliku 2.13 (a), gde je bilo potrebno izdvojiti svetliji objekat od tamnije pozadine, određeno je da se, u binarnoj slici, svim pikselima čija je vrednost nivoa intenziteta veća ili jednaka od praga  $T$  dodeli vrednost 1 (bela), a u suprotnom, odnosno svim pikselima čija je vrednost nivoa intenziteta manja od praga  $T$  dodeli vrednost 0 (crna). Prema tome, na binarnoj slici (Slika 2.13 (b)), pikseli koji imaju vrednost 1 pripadaju objektu, a oni koji imaju vrednost 0 pripadaju pozadini.



**Slika 2.13** Segmentacija sa jednim pragom: originalna slika (a), segmentirana slika (b) [8]

Kada je  $T$  konstanta primenljiva na celokupnu sliku, onda se taj prag naziva globalni prag [138]. U takvim slučajevima, oblik histograma je bimodalni sa vrhovima koji odgovaraju području objekta i pozadini, a između njih je dolina (Slika 2.14 (a)), pa se tačka doline bira kao prag  $T$  [8]. Ipak, postoji nekoliko ograničenja globalnog praga, koji se ogledaju u tome da ne postoji garancija da će segmentirani pikseli biti povezani (prag ne uzima u obzir prostorne odnose između piksela), osetljivost praga na slučajne i nekontrolisane promene u osvetljenju, i primenljiv je samo za one jednostavne slučajeve u kojima se celokupna slika može podeliti na dve vrste regiona [144]. Takođe, da bi ovaj metod segmentacije bio efikasan, potrebno je da objekat i pozadina imaju dovoljan kontrast i da budu poznate vrednosti nivoa intenziteta svakog objekta ili pozadine. Kod metoda sa jednim konstantnim pragom, ova karakteristika intenziteta određuje vrednost praga.



**Slika 2.14** Histogrami slika koji mogu biti segmentirani korišćenjem jednog praga (a) i dva praga (b) [138]

Međutim, kada se vrednost  $T$  promeni na slici, onda se radi o promenljivom (višestruk, adaptivnom) pragu (engl. *multilevel thresholding*) [138]. U tom slučaju, slika se deli na različite regione koristeći višestruke vrednosti praga. Na slici 2.14 (b) je prikazan histogram sa tri dominantne oblasti koji odgovaraju, na primer, slici sa dve vrste svetlih objekata na tamnoj pozadini. Ovde, na osnovu višestrukog praga, piksel  $(x,y)$  pripada pozadini ako je  $f(x,y) \leq T_1$ , jednom objektu ako je  $T_1 < f(x,y) \leq T_2$ , ili drugom objektu ako je  $f(x,y) > T_2$ . Tako, segmentirana (binarna) slika  $g(x,y)$  je data sledećim izrazom [138]:

$$g(x,y) = \begin{cases} a, & \text{ako je } f(x,y) > T_2 \\ b, & \text{ako je } T_1 < f(x,y) \leq T_2 \\ c, & \text{ako je } f(x,y) \leq T_1 \end{cases} \quad (8)$$

gde su  $a$ ,  $b$  i  $c$  bilo koje tri jasne vrednosti nivoa intenziteta. Histogrami su u takvim slučajevima multimodalni, sa dolinama između vrhova (Slika 2.14 (b)). Ako su objekti u sceni razdvojeni i njihovi nivoi sive se jasno razlikuju od pozadine, tada je histogram multimodalni, pri čemu je svaki vrh posebno odvojen od drugog. Za segmentaciju takve slike, doline između vrhova biraju se kao vrednosti pragova  $T_1$  i  $T_2$  (Slika 2.14 (b)) [8]. Termin lokalni ili regionalni prag se ponekad koristi za označavanje promenljivog praga u kome vrednost  $T$  u bilo kojoj tački  $(x,y)$  na slici zavisi od svojstava susedstva te tačke  $(x,y)$ , na primer prosečan nivo sive boje u okolini tačke  $(x,y)$ . Zbog toga i postoji zavisnost lokalnog praga od pozicije piksela [136]. Ako  $T$  zavisi od samih prostornih koordinata  $(x,y)$ , promenljivi prag se često naziva dinamički prag [8, 138]. Postoji mnogo modifikacija koje koriste višestruke pragove, pa čak i one metode kod kojih, posle segmentacije, dobijena slika više nije binarna, već slika koja se sastoji od vrlo ograničenog niza sive boje [136].

Ispravan odabir praga je ključan za uspešnu segmentaciju zasnovanu na pragu. Vrednosti praga se mogu odrediti iterativnim postupkom, na osnovu iskustva, korišćenjem histograma ili čak može biti rezultat neke posebne metode detekcije pragova. Pored toga, veliki uticaj na ovaj metod segmentacije imaju i osvetljenje i refleksija jer, čak i na vrlo jednostavnim slikama, moguće je postojanje varijacija u nivou sive boje u objektima i pozadini, kao posledica neravnomernog osvetljenja, nejednakih ulaznih parametara uređaja ili niza drugih faktora [138], [136]. Iako je korišćenje vrednosti nivoa intenziteta jedan od najčešćih parametara za određivanje praga, mogu se koristiti i drugi parametri slike, kao na primer, gradijent, lokalno svojstvo teksture, itd. [136].

#### **2.4.2.2. Segmentacija rastom regiona**

Regioni u slici predstavljaju grupu povezanih piksela sa istim ili sličnim osobinama. U procesu segmentacije, regioni su jako važni, jer se pomoću njih može izvršiti detekcija određenih objekata u sceni. Međutim, za složenije scene, potrebno je vršiti kreiranje regiona na osnovu određenih kriterijuma.

Segmentacija zasnovana na rastu regiona predstavlja postupak u kome se grupišu pikseli u regione na osnovu unapred definisanih kriterijuma sličnosti. Osnovni pristup u ovoj metodi je započeti postupak segmentacije skupom „semenskih” tačaka ili „semenskih” piksela (engl. „*seed*” *points/pixels*), a zatim svakom semenskom pikselu pridruživati one susedne piksele koji imaju unapred definisana svojstva slična semenskom (poput određenih opsega nivoa intenziteta, boje, teksture) [138]. Zatim, pridruženi pikseli postaju semenski pikseli koji ponavljaju ovaj proces i tako nadalje. Spajanjem susednih piksela dolazi do rasta regiona. Ovo je iterativni proces gde svaki semenski piksel iterativno raste, sve dok se svaki piksel na slici ne obradi i na taj način formiraju različiti regioni čije su granice definisane zatvorenim mnogouglovima [8].

Odabir skupa jednog ili više polaznih (semenskih) piksela zavisi od prirode samog problema. Kada na početku nije moguće odrediti te piksele, za svaki piksel se izračunava isti skup svojstava koji će se koristiti za dodelu piksela regionima tokom procesa rasta. Ako rezultat ovih izračunavanja daje klaster vrednosti, pikseli čija se svojstva smeštaju u sredinu ovih klastera mogu se koristiti kao semenske tačke [138].

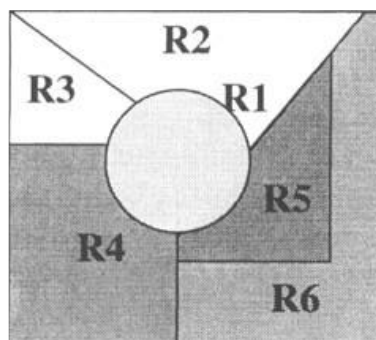
Izbor kriterijuma sličnosti ne zavisi samo od problema koji se razmatra, već i od vrste dostupnih podataka iz scene. Za određene potrebe, neophodno je raditi sa slikama u boji a, kada su slike monohromatske, analiza regiona može se izvršiti sa setom deskriptora na osnovu nivoa intenziteta i prostornih svojstava (kao što su momenti ili tekstura). Deskriptori mogu da daju

pogrešne rezultate ako se svojstva povezivanja ne koriste u procesu rasta regiona [138]. Pored toga, često je slučaj da samo određivanje jednog opšteg kriterijuma sličnosti za celu sliku nije efikasna osnova za segmentaciju i potrebno je razmotriti prostorne odnose između susednih tačaka [144]. S obzirom da se obično, u procesu segmentacije rastom regiona, počinje od određenog broja semenskih piksela koji su nasumično raspoređeni po slici, kriterijumi sličnosti (na primer, nivo intenziteta) se mogu razlikovati za svaki semenski piksel. Često upotrebljavani kriterijumi sličnosti kod sivih slika su [144]:

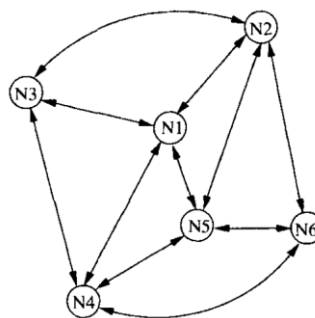
1. apsolutna razlika u nivoima intenziteta između piksela-kandidata i semenskog piksela mora biti u određenom opsegu;
2. apsolutna razlika u nivoima intenziteta između piksela-kandidata i trenutnog prosečnog nivoa intenziteta rastućeg regiona mora da biti unutar određenog opsega;
3. razlika između standardnog odstupanja nivoa intenziteta određenog dela lokalnog okruženja piksela-kandidata i celog lokalnog okruženja piksela-kandidata mora (ili ne mora) da pređe određeni prag - ovo je osnovni kriterijum hrapavosti/glatkoće.

Drugi problem kod segmentacije zasnovane na rastu regiona je formulacija pravila o zaustavljanju rasta. Rast regiona trebalo bi da prestane kada više piksela ne zadovoljavaju kriterijume za dodavanje u taj region. Kriterijumi poput nivoa intenziteta, teksture i boje su lokalne prirode i ne uzimaju u obzir „istoriju” rasta regiona. U slučaju potrebe, mogu se koristiti i dodatni kriterijumi koji koriste koncept veličine, sličnosti između piksela-kandidata i piksela koji su već dodati u region i oblik rastućeg regiona. Upotreba ovih vrsta deskriptora zasniva se na pretpostavci da je model očekivanih rezultata barem delimično dostupan [138].

Zavisnost susedstva između regiona u sceni može se predstaviti grafikom susedstva regiona (engl. *region adjacency graph (RAG)*) [8]. Regioni u sceni su predstavljeni skupom čvorova  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_m\}$  na RAG-u, gde čvor  $N_i$  predstavlja region  $R_i$  u sceni, a svojstva regiona  $R_i$  sačuvana su u strukturi podataka čvora  $N_i$  (Slika 2.15). Ivice  $e_{i,j}$  između  $N_i$  i  $N_j$  predstavlja susedstvo između regiona  $R_i$  i  $R_j$ . Dva regiona  $R_i$  i  $R_j$  su susedna ako postoji piksel u regionu  $R_i$  i piksel u regionu  $R_j$  koji su međusobno susedni. Susedstvo može biti određeno povezivanjem 4 ili 8 susednih piksela [8]. Relacija susedstva je reflektivna ili simetrična, ali ne mora biti prelazna. Na slici 2.15 je prikazan grafik susedstva scene sa šest posebnih regiona.



(a)



(b)

Slika 2.15 Scena sa 6 posebnih regiona (a), RAG date scene (b) [8]

### 2.4.2.3. Segmentacija spajanjem i razdvajanjem regiona

Postupak segmentacije, koji se zasniva na spajanju regiona, kombinuje regione koji se smatraju sličnim [145]. Međutim, osnovni uslov za spajanje regiona, pored ispunjenja kriterijuma sličnosti, jeste i da regioni koji se spajaju moraju biti susedni. Jednostavni algoritam spajanja regiona sadrži sledeće korake [8]:

1. Segmentacija slike na regione  $R_1, R_2, \dots, R_m$  korišćenjem skupa pragova ( $T$ ).
2. Kreiranje grafika susedstva regiona.
3. Za svaki  $R_i, i=1, 2, \dots, m$ , identifikacija sve  $R_j, j \neq i$ , iz grafika susedstva regiona tako da je  $R_j$  sused  $R_i$ .
4. Izračunavanje odgovarajuće merljive sličnosti  $S_{ij}$  između  $R_i$  i  $R_j$ , sa sve  $i$  i  $j$ , i definisati kriterijum sličnosti.
5. Ako je  $S_{ij} > T$ , spajanje  $R_i$  i  $R_j$ .
6. Ponavljanje koraka 3 do 5 sve dok se ne spoje svi regioni u skladu sa kriterijumom sličnosti.

Jedan od najvažnijih koraka u procesu spajanja regiona je određivanje kriterijuma sličnosti između dva regiona, odnosno koja dva regiona jesu slična, a koja ne. Većina pristupa se zasniva na kriterijumu koji sadrži karakteristike kao što su nivo intenziteta piksela u regionu ili slabost granica (ivica) između regiona [8, 145]. Dakle, određena karakteristika regiona se poredi sa istom karakteristikom susednog regiona, i time se utvrđuje ispunjenost kriterijuma sličnosti. Ako je kriterijum sličnosti ispunjen, regioni se označavaju kao slični i spajaju se u veći novi region i izračunava se njegova karakteristika. U suprotnom, regioni se označavaju da nisu slični. Spajanje susednih regiona se nastavlja između svih susednih, uključujući i one koji su novoformirani. Ako region ne može biti spojen ni sa jednim susednim regionom, označava se kao „konačni”, i proces spajanja se zaustavlja, kada su svi regioni na slici tako označeni



[136]. Rezultat spajanja regiona obično zavisi od redosleda spajanja regiona, tako da se rezultati segmentacije mogu razlikovati u zavisnosti od toga da li segmentacija počne, na primer u gornjem levom ili donjem desnom uglu slike. Redosled spajanja regiona može uzrokovati da dva slična regiona  $R_1$  i  $R_2$  ne budu spojena, budući da je ranije spajanje koristilo region  $R_1$ , pa njegove nove karakteristike više ne dozvoljavaju njegovo spajanje s regionom  $R_2$ . Ako se spajanje vrši drugačijim redosledom, onda može doći do spajanja ova dva regiona [136]. Zbog toga se, veoma često, prilikom određivanja kriterijuma sličnosti, može uključiti i međusobna prostorna blizina regiona [145].

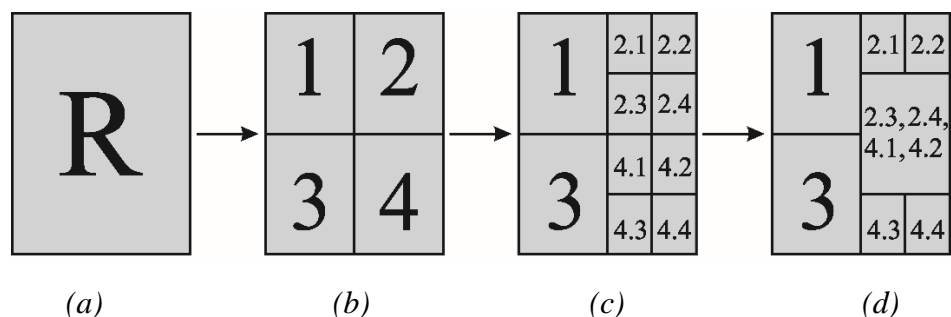
Segmentacija razdvajanjem regiona je suprotan postupak spajanju regiona  $i$ , obično, počinje sa celom slikom koja je predstavljena kao jedan region [136]. Razdvajanje regiona se vrši ako neko svojstvo regiona nije konstanto, i to tako što se celokupna slika, kao jedinstveni region, sukcesivno razdvaja na manje regione sve dok dalje podele ne dovedu do toga da razlike između susednih regiona budu ispod nekog odabranog praga [144]. Osnovni algoritam za razdvajanje regiona ima sledeće korake [145]:

1. Formirati inicijalne regione u slici.
2. Za svaki region u slici, rekurzivno (sa ponavljanjem) izvršiti sledeće korake:
  - a. izračunati promene u nivoima intenziteta za svaki region.
  - b. ako je promena iznad praga, razdvojiti region duž odgovarajuće granice.

Najčešći problemi koji se javljaju u postupku razdvajanja regiona leži u odlučivanju koje svojstvo nije konstantno u regionu  $i$  kako razdvojiti region tako da svojstvo svakog regiona-komponente bude konstantno. Ova pitanja su obično zavisna od aplikacije i zahtevaju poznavanje karakteristika regiona za tu aplikaciju. U nekim aplikacijama, promena nivoa intenziteta se koristi kao mera koliko su nijanse sive bliske konstanti. U drugim aplikacijama, funkcija se fituje da bi se aproksimirale osnovne vrednosti nivoa intenziteta. Greška između ove funkcije i trenutne vrednosti nivoa intenziteta se koristi kao mera sličnosti regiona. Takođe, za donošenje odluke gde razdvojiti region, može se koristiti pristup koji određuje najbolju granicu za deljenje regiona tako što se razmatra snaga ivice u okviru regiona. Najlakši metod razdvajanja regiona je taj koji deli region na konačan broj regiona jednakih dimenzija. Ova vrsta metode se naziva regularna metoda dekompozicije [145].

Međutim, kombinacija razdvajanja i spajanja regiona može rezultirati metodom koja ima prednosti oba pristupa. Postupak ove metode segmentacije počinje razdvajanjem jednog regiona  $R$ , obično cele slike, na četiri jednaka regiona (Slika 2.16 (b)) [138, 144]. Nakon toga, razmatra se, za svaki region posebno, da li svi pikseli u regionu zadovoljavaju unapred

definisani kriterijum sličnosti (kriterijumi sličnosti mogu biti definisani kao u prethodnim metodama). Region u kome je zadovoljen kriterijum sličnosti, se obeležava, a region, u kome nije zadovoljen kriterijum sličnosti, se dalje deli na četiri manja regiona (Slika 2.16 (c)). Ovaj proces se dalje nastavlja sve dok postoje regioni u kojima nije ispunjen kriterijum sličnosti. U najgorem slučaju, može se dogoditi da su neki regioni veličine samo jednog piksela. Ipak, uobičajeno je definisati minimalnu vrednost veličine regiona, ispod koje dalje razdvajanje nije moguće [138].



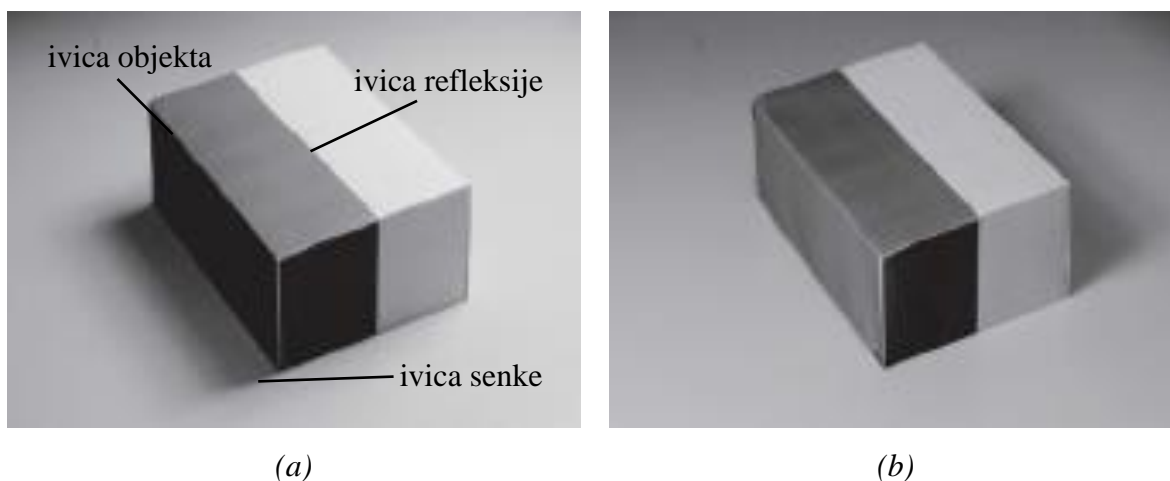
**Slika 2.16** Postupak razdvajanja i spajanja regiona

Međutim, ako bi se vršilo samo razdvajanje, rezultat segmentacije bi verovatno sadržao mnoge susedne regione koje imaju identična ili slična svojstva. Stoga se postupak spajanja koristi nakon svakog razdvajanja. Ovaj postupak, prema unapred definisanom kriterijumu sličnosti, upoređuje susedne regione i spaja one regione koji ispunjavaju zadati kriterijum u veće regione (Slika 2.16 (d)). Kada nije moguće vršiti dalji postupak razdvajanja i spajanja, segmentacija je završena [144].

#### 2.4.2.4. Detekcija ivica

Ivica u fizičkom smislu odgovara diskontinuitetu fizičkih, fotometrijskih ili geometrijskih osobina objekta, što predstavlja značajnu vizuelnu informaciju u procesu kako uočavanja nekog objekta, tako i spoznaje osobina tog objekta [146, 147]. Pored toga, ivica označava granicu između objekta i pozadine i/ili granicu između objekata koji se preklapaju. To znači da ako se ivice na slici mogu precizno identifikovati, svi se objekti mogu locirati, a osnovna svojstva kao što su površina, obod i oblik mogu se meriti [148]. Sa druge strane, slika se može posmatrati kao skup regiona koji su povezani i bez preklapanja [8]. Pikseli u svakom regionu poseduju identičan skup svojstava ili atributa koji se odnose na nivoe sive (nivo intenziteta) boje, kontrast, spektralne vrednosti, teksturna svojstva, itd. Ova svojstva mogu biti rezultat varijacija refleksije, osvetljenja, boje, senke, teksture, orijentacije i dubine scene. Tako na primer, ivice mogu biti ivice objekta, koje odgovaraju stvarnog geometrijskoj granici između dva objekta ili objekta i okoline, ivice refleksije uzrokovane su diskontinuitetima

refleksije površine objekta, dok ivice senke nastaju na granicama između direktno osvetljenih regiona i regiona u senci objekta (Slika 2.17). Ivice refleksije i senke se nazivaju i pseudo-ivicama jer zapravo ne odgovaraju postojećim geometrijskim karakteristikama u realnoj sceni [11]. Upravo ova svojstva, kao i osvetljenost scene, utiču na pojavu naglih promena nivoa intenziteta. Za podelu slike na regione, to može koristiti kao osnova za segmentaciju zasnovanu na ivicama [149].

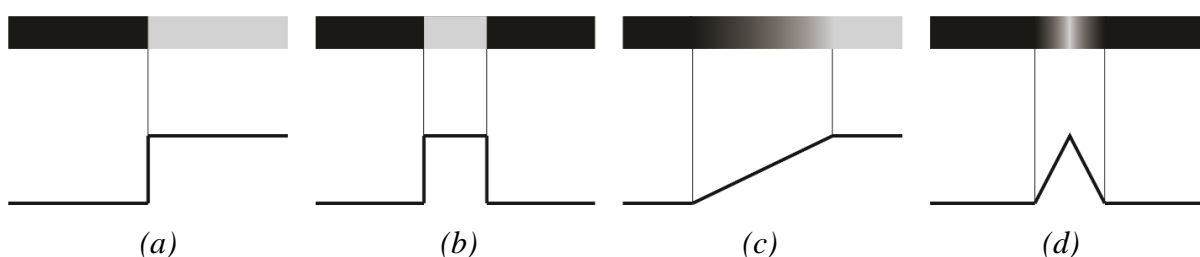


**Slika 2.17** Slika sa ivicama objekta, ivicama refleksije i ivicama senke (a); Slika iste scene pod drugačijim uslovima osvetljenja (b) [11]

Na slici, ivica je tačka ili skup tačaka koji stvara krivu koja prati put značajnih lokalnih promena (diskontinuiteta) u nivou intenziteta i, zbog toga, ivice nose puno informacija o različitim regionima na slici [8]. Pikseli ivice (tačke ivice) su pikseli gde dolazi do značajne promene u nivou intenziteta, dok je ivica skup povezanih piksela ivice [138]. Pored ivica, linije se takođe mogu prepoznati koristeći nagle promene nivoa intenziteta. Međutim, postoji bitna razlika između ivica i linija - ivica u suštini definiše granice između dva različita regiona, dok linija može biti deo jednog homogenog regiona, odnosno čak može biti i u samom regionu [136, 145, 147].

Modeli ivica mogu biti podeljeni na osnovu profila nivoa intenziteta [138, 145]. Kod koračnog modela (engl. *step*), nivo intenziteta slike se naglo menja iz jedne vrednosti na jednoj strani promene u drugu vrednost na suprotnoj strani, odnosno prelaz između dva nivoa intenziteta nastaje u idealnom slučaju na udaljenosti od jednog piksela. Na slici 2.18 (a) prikazan je presek vertikalne koračne ivice i horizontalni profil nivoa intenziteta kroz ivicu. Ove čiste, idealne ivice mogu se pojaviti na udaljenosti od jednog piksela, pod uslovom da se ne koriste dodatne obrade (kao što je zaglađivanje) koje bi uticale da ivice izgledaju „stvarno”. Linijski model (engl. *line*) je sličan koračnom, pri čemu se ovde nivo intenziteta slike naglo

menja, ali vraća početnu vrednost nakon male distance (Slika 2.18 (b)). Međutim, u praktičnoj primeni, digitalne slike sadrže ivice koje su zamućene i sadrže šum, gde je stepen zamućenosti i šuma određeni ograničenjima delovima kamere. Zbog toga, tačniji model ivica je rampni (engl. *ramp*) kod koga je nagib rampe obrnuto proporcionalan stepenu zamućenosti u ivici. U ovom modelu prelaz nije na udaljenosti od jednog piksela, već je tačka ivice sada bilo koja tačka koja se nalazi u rampi, a ivica je skup takvih tačaka koje su povezane (Slika 2.18 (c)). Model krovne ivice je zapravo linijski model kroz region, pri čemu je osnova (širina) ivice krova određena debljinom i oštrinom linije. Kada je njegova baza široka jedan piksel, krovna ivica je linija debljine jednog piksela koja prolazi kroz region na slici (Slika 2.18 (d)).



**Slika 2.18** Idealna reprezentacija modela koračne (a), linijske (b), rampne (c) i krovne ivice (d) i odgovarajući profili nivoa intenziteta

Detekcija ivica je proces sa ciljem da se otkriju značajne lokalne promene nivoa intenziteta piksela na slici, odnosno da se detektuju pikseli (tačke) ivica [138]. Kod grayscale slika, pod promenom nivoa intenziteta piksela, smatra se promena nivoa intenziteta u opsegu od 0 do 255, odnosno promena nijanse sive boje. Promena nivoa intenziteta meri se gradijentom slike, a gradijent meri promene u funkciji, tako da je slika  $f(x, y)$  dvodimenzionalna funkcija, a njen gradijent je vektor [8]:

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dx} \\ \frac{df}{dy} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Intenzitet gradijenta se može izračunati sledećom relacijom [8]:

$$\begin{aligned} G[f(x, y)] &= \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ G[f(x, y)] &= |G_x| + |G_y| \\ G[f(x, y)] &= \max\{|G_x|, |G_y|\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Jednačine (10) predstavljaju tri moguća načina za izračunavanje intenziteta gradijenta. Pravac gradijenta se izračunava sledećom relacijom (ugao  $\theta$  se meri u odnosu na  $x$  osu) [8]:

$$\theta(x, y) = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (11)$$

Operatori gradijenata izračunavaju promenu nivoa intenziteta, kao i pravac promene. Ovo izračunavanje se vrši razlikom intenziteta susednih piksela, tj. diferenciranjem duž  $x$  ose i diferenciranjem duž  $y$  ose. Gradijenti u dvodimenzionalnoj slici su aproksimirani sledećom relacijom [8]:

$$\begin{aligned} G_x &= f(i + 1, j) - f(i, j), \\ G_y &= f(i, j + 1) - f(i, j). \end{aligned} \quad (12)$$

Za dobijanje gradijenta u  $x$  pravcu i gradijenta u  $y$  pravcu, za operatore gradijenata su potrebne dve maske. Međutim, ova dva gradijenta se kombinuju kako bi se dobila vektorska veličina čiji intenzitet predstavlja intenzitet gradijenta ivice u tački na slici a ugao predstavlja pravac gradijenta.

Ivice dobijene od detektora ivica mogu biti podeljene u dve grupe: tačne (ispravne), koje odgovaraju ivicama u sceni, i netačne (lažne) ivice, koje ne odgovaraju ivicama u sceni. Treća grupa ivica može biti definisan kao one ivice u sceni koje su trebale biti detektovane i to su propuštene ivice. Lažne ivice se nazivaju lažno pozitivne, dok se propuštene ivice nazivaju lažno negativne [145]. Cilj idealnog detektora ivica je tačno otkriti tačku ivice u smislu da se ne sme propustiti ispravna ivica na slici, ali lažna ivica ne sme biti greškom detektovana. Međutim, kako kvalitet detekcije zavisi od uslova osvetljenja, prisustva objekata sličnog nivoa intenziteta, gustine ivica u sceni i šuma, itd. različiti detektori ivica zasnovani na operatorima se koriste u različite svrhe. Neki od detektora ivica koji se koriste za grayscale slike, a zasnivaju se na prvom izvodu su Roberts, Sobel, Prewitt i Canny, kao i Laplasijan Gausijana (engl. *Laplacian of Gaussian (LoG)*), koji je detektor ivica zasnovan na drugom izvodu [8].

Roberts detektor ivica je zasnovan na  $2 \times 2$  operatoru gradijenta, koji se koristi za aproksimaciju intenziteta gradijenta slike pomoću diskretnog diferenciranja, što se postiže računanjem suma kvadrata razlika između dijagonalno susednih piksela. Ova aproksimacija intenziteta gradijenta je data sledećom relacijom [8]:

$$G[f(i, j)] = [f(i, j) - f(i + 1, j + 1)] + [f(i + 1, j) - f(i, j + 1)]. \quad (13)$$

Konvoluciona maska za Roberts operator je  $2 \times 2$  maska (Slika 2.19 (a)) i, s obzirom da se moraju ispitati samo četiri ulazna piksela da bi se utvrdila vrednost svakog izlaznog piksela, a u proračunu se koriste samo operacije sabiranja i oduzimanja, ovaj detektor je brz, ali je vrlo osetljiv na šum [8].

1	1
-1	-1

(a)

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

(b)

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

(c)

**Slika 2.19** Roberts maska (a), Sobel maska za izračunavanje gradijenta  $G_x$  (b) i gradijenta  $G_y$  (c) [149]

Sobel detektor ivica je operator zasnovan na  $3 \times 3$  susedstvu operatora gradijenta, koji izračunava aproksimaciju gradijenta funkcije intenziteta slike [8]. Ovaj detektor pronalazi pravac najvećeg povećanja od svetlog ka tamnom i brzinu promene u tom pravcu. Konvolucione maske (Slika 2.19 (b), (c)) za Sobel operator se odvojeno primenjuju na ulaznoj slici. Razlog za to je da daju dve gradijentne komponente  $G_x$  i  $G_y$ , u horizontalnoj i vertikalnoj orijentaciji, redom, kao što je dato sledećim relacijama [8]:

$$G_x = [f(i-1, j-1) + 2f(i-1, j) + f(i-1, j+1)] - [f(i+1, j-1) + 2f(i+1, j) + f(i+1, j+1)] \quad (14)$$

$$G_y = [f(i-1, j-1) + 2f(i, j-1) + f(i+1, j-1)] - [f(i-1, j+1) + 2f(i, j+1) + f(i+1, j+1)] \quad (15)$$

Intenzitet gradijenta se izračunava sledećom relacijom [8]:

$$G[f(x, y)] = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (16)$$

Prewitt detector ivica je zasnovan na Prewitt operatoru, koji izračunava aproksimaciju funkcije intenziteta gradijenta slike pomoću diskretnog diferenciranja [8]. Operator izračunava intenzitet gradijenta slike u svakoj tački, dajući pravac najvećeg mogućeg povećanja od svetlog ka tamnom i brzinu promene u tom pravcu. Rezultat pokazuje kako se „naglo” ili „glatko” slika menja u tom trenutku, a samim tim i kolika je verovatnoća da taj deo slike predstavlja ivicu, kao i kako je ta ivica verovatno orijentisana. U praksi je izračunavanje ove veličine (verovatnoće ivice) pouzdanije i lakše za tumačenje od izračunavanja pravca. Ovaj operator je definisanom skupom od osam maski - od kojih su četiri prikazane na slici 2.20. Ostale maske se generišu rotacijom za  $90^\circ$ , sukcesivno [8]. Na taj način maska daje maksimalni odziv kroz davanje pravca gradijenta. Za ovaj detektor, računanje intenziteta i pravca gradijenta se vrši kao kod Sobel operatora.

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

0	1	1
-1	0	1
-1	-1	0

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

-1	-1	0
-1	0	1
0	1	1

Slika 2.20 Prewitt maska u 90° sukcesivnim rotacijama [149]

Canny detektor ivica zasnovan je na operatoru koji koristi algoritam u više faza, što uključuje: detekciju ivice sa niskom stopom greške, detektovana tačka ivice mora biti dobro lokalizovana (lokalizovane ivice moraju biti što je moguće bliže pravim ivicama), odziv jedne tačke ivice (detektor treba da vrati samo jednu tačku za svaku stvarnu tačku ivice) i, tamo gde je moguće, šum ne bi trebalo da kreira lažne ivice [150, 151, 152, 153]. Canny algoritam za otkrivanje ivica se sastoji od sledećih osnovnih koraka [8, 147, 149, 154, 155, 156, 157]:

1. Zaglađivanje (engl. *smoothing*) ulazne slike pomoću Gausovog filtera kako bi se uklonio šum;
2. Izračunavanje intenziteta i pravca gradijenta;
3. Primena ne-maksimalne supresije (potiskivanje) na intenzitet gradijenta slike;
4. Provera i povezivanje ivica.

Četvrti korak može biti podeljen i na dve etape, i to: upotreba dvostrukog praga za određivanje potencijalnih ivica i analiza povezanosti za finaliziranje detektovanja supresijom svih ostalih ivica koje su slabe i nisu povezane sa jakim ivicama.

Zaglađivanje slike se vrši Gausovim glatkim filterom kako bi se uklonio šum. Ovaj filter je linearno odvojiv i može se podeliti na dva dela. Konvolucija pomoću ovog filtera može se izvršiti da bi se slika zagladila prema vrsti i koloni. Matematički izraz Gausovog glatkog filtera za zaglađivanje je [156]:

$$G(x, y) = \left( \frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{\left( -\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (17)$$

gde je  $\sigma$  standardna devijacija Gausovog glatkog filtera, koja kontroliše stepen zaglađivanja. U slučaju da je vrednost  $\sigma$  niska, biće dobra lokalizacija i niži SNR (odnos signal-šum), ali ako je vrednost  $\sigma$  visoka, tačnost lokacije će biti niža, ali biće i manje šuma. Nakon primene Gausovog glatkog filtera, slika se može predstaviti na sledećom relacijom [156]:

$$I(x, y) = G(x, y) * f(x, y) \quad (18)$$

gde je  $f(x, y)$  originalna slika, a  $I(x, y)$  slika nakon filtriranja.

Drugi korak, u kome se vrši izračunavanje intenziteta i pravca gradijenta, daje dva rezultata, gradijent u x pravcu i gradijent u y pravcu i prikazuje promene u intenzitetu slike, koje ukazuju na prisustvo ivica. Za izračunavanje izvoda horizontalnog pravca  $P_x$  i izvoda vertikalnog pravca  $P_y$ , algoritam usvaja ograničenu razliku prvog reda  $2 \times 2$  susedne oblasti. Izrazi za  $P_x$  i  $P_y$  su [156]:

$$P_x(i, j) = \frac{I(i+1, j) - I(i, j) + I(i+1, j+1) - I(i, j+1)}{2} \quad (19)$$

$$P_y(i, j) = \frac{I(i, j+1) - I(i, j) + I(i+1, j+1) - I(i+1, j)}{2} \quad (20)$$

Intenzitet i pravac gradijenta se određuju na relacijama (21) i (22), redom [156].

$$M(i, j) = \sqrt{P_x(i, j)^2 + P_y(i, j)^2} \quad (21)$$

$$\theta(i, j) = \arctg\left(\frac{P_y(i, j)}{P_x(i, j)}\right) \quad (22)$$

Treći korak se odnosi na to da gradijent slike ne može dati ivice slike, a treba zadovoljiti kriterijum da detektor treba da vrati samo jednu tačku za svaku stvarnu tačku ivice. U ovom koraku, algoritam upoređuje vrednost gradijenta trenutnog piksela i piksela u susedstvu, bilo u pozitivnom ili negativnom pravcu upravnom na gradijent. Ako vrednost trenutnog piksela nije veća od vrednosti piksela u susedstvu, onda algoritam trenutni piksel potiskuje (supresuje), odnosno „odbacuje”, a u suprotnom ga sačuva, odnosno „prihvata” [150].

Nakon ne-maksimalne supresije, lažne ivice izazvane promenama šuma i boja treba da budu smanjene što je više moguće. U ovom koraku se vrši filtriranje piksela ivica sa malim intenzitetom gradijenta i očuvanje piksela ivica sa velikim intenzitetom gradijenta. Tako, na osnovu iskustva se određuju dva praga, nizak  $T_l$  i visok prag  $T_h$ . Ako je intenzitet gradijenta piksela  $(i, j)$  veći od  $T_h$ , onda se usvaja da taj piksel pripada ivici, i na taj način se formira mapa ivica  $T_l(i, j)$ . Ako je intenzitet gradijenta piksela  $(i, j)$  manji od  $T_l$ , onda se usvaja da taj piksel ne pripada ivici. Međutim, ako je intenzitet gradijenta piksela  $(i, j)$  veći od  $T_l$  i manji od  $T_h$ , onda se na taj način formira mapa ivica  $T_2(i, j)$ . Ako se piksel koji pripada mapi  $T_2(i, j)$  nađe na 8 susednih lokacija piksela koji pripada ivici, onda će taj piksel biti povezan sa onim koji pripada ivici [150].

Laplacijan Gausijana (LoG) detektor ivica je zasnovan na operatoru koji prvo primenjuje Gausovo zaglađivanje, praćeno Laplacijanovim operatorom. Gausova funkcija smanjuje šum, a rezultujuća Laplacijanovaa maska minimizira verovatnoću detektovanja lažnih ivica. Nakon toga se obavlja konačna provera nultih prelaza (engl. *zero crossings*), tj.



kada rezultujuća vrednost prelazi iz negativne u pozitivnu ili obrnuto. LoG funkcija za konvoluciju je definisana na sledećom relaciji [8]:

$$LOG(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

Konvoluciona maska 5×5 za LoG detektor ivica je data sledećom relacijom [149]:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} . \quad (24)$$

Kvalitet procesa detekcije ivica, pre svega zavisi od kvaliteta slike, jer kod obrade slika lošeg kvaliteta (prisustvo zamućenja i šuma), neke od metoda detekcije ivica proizvode lažne ivice i praznine, koje je veoma teško identifikovati, pa su njihove primene ograničene. Pored toga, detekcija ivica zavisi od uslova osvetljenja, prisustva predmeta sličnog intenziteta, gustine ivica u sceni, itd. Određivanje optimalnog praga je od ključne važnosti za ispravnu i kvalitetnu detekciju ivica. U toku postupka povezivanja ivica, može doći do pojave diskontinuiteta i praznina u slici, a sa druge strane neke metode koriste proizvoljnu interpolaciju da bi se popunile granične praznine [8, 146, 147].

Detekcija ivica je važna tehnika u obradi slike, i mašinskoj i računarskoj viziji. Upotreba ove tehnika je veoma zastupljena u različitim oblastima, kao što su detekcija i lokalizacija objekata u aplikacijama za ljude [158, 159, 160], aplikacije za vozila i transport [146, 149, 161, 162, 163, 164], klasifikacija u meteorološkim aplikacijama [165], prepoznavanje predmeta u medicinskim aplikacijama [166], detekciji i obradi teksta [167], itd.

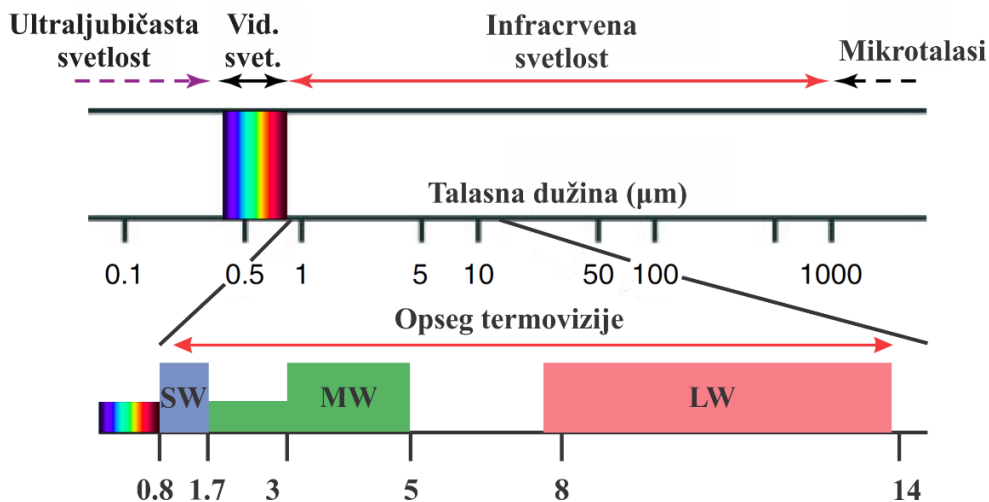
## 2.5. Termovizija

### 2.5.1. Osnove termografije

Infracrvena svetlost u elektromagnetnom spektru zauzima opseg od 780 nm do 1mm (0,78 μm-1000 μm). Međutim, kako je mali deo tog opsega upotrebljiv, definisana su tri opsega (Slika 2.21) [139]:

- kratkotalasni (SW) opseg od oko 0,9 do 1,7 μm,
- srednjetalasni (MW) od oko 3 do 5 μm,
- dugotalasni (LW) od oko 7 do 14 μm.

Ipak, u literaturi se, pored napred navedena tri opsega, mogu naći još dva i to: bliski infracrveni opseg (NIR) u opsegu od 0,7  $\mu\text{m}$  do 1,4  $\mu\text{m}$ , koji se jednim delom preklapa sa kratkotalasnim i daleki infracrveni opseg (FIR), koji je u opsegu od oko 15  $\mu\text{m}$  do 1mm.



**Slika 2.21** Deo elektromagnetnog spektra – opseg infracrvene svetlosti [139]

Termografija je tehnika koja omogućava vizuelizaciju zračenja u infracrvenom (IC) delu spektra. Najvažniji proces u termografiji je tzv. toplotno zračenje. Ovaj pojam podrazumeva da svaki objekat čija je temperatura iznad temperature apsolutne nule ( $T > 0 \text{ K}$ ;  $T > -273.15 \text{ °C}$ ) emituje elektromagnetno (EM) zračenje. Apsolutna nula je temperatura u kojoj su zauzeta najniža kvantna energetska stanja za elektrone, atome i molekule i nisu mogući prelazi između energetskih stanja koji bi rezultirali emisijom EM zračenja. Količina zračenja koju emituje objekat i njegova raspodela po spektru talasne dužine zavisi od temperature i svojstava materijala [139, 168].

### 2.5.2. Snaga zračenja, odavanje zračenja i iradijansa

U svakoj praktičnoj upotrebi infracrvene kamere (termovizijske kamere), objekat emituje zračenje u pravcu kamere, gde je ono fokusirano na detektor i mereno kvantitativno. Tako, ako postoji zračeći element  $dA$  površine objekta, totalni fluks energije  $d\Phi$ , od elementa  $dA$  površine u hemisferu se naziva snaga, snaga zračenja ili fluks energije, sa SI jedinicom  $W$  (vat). Međutim, količina može biti merena samo direktno, ako detektor sakuplja kompletno zračenje od hemisfere, ali to obično nije slučaj. Ako je snaga zračenja povezana sa zračećom površinom, odavanje zračenja  $M$  u jedinicama  $Wm^{-2}$ , se može izraziti sledećom relacijom [139]:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (25)$$



Jasno je da odavanje zračenja  $M$  karakteriše totalnu snagu zračenja u hemisferi koju emituje površina. Ovaj fluks energije sadrži udele svih emitovanih talasnih dužina (zbog jednostavnosti, pišu se totalni izvodi, iako su to parcijalni izvodi, jer snaga zračenja zavisi samo od uglova i talasne dužine). Sa druge strane, ako se razmatra totalna incidentna snaga iz hemisfere na datoj površini  $dA$ , to vodi do iradijansa  $E = d\Phi / dA$ . Odavanje zračenja  $M$  i iradijansa  $E$  se odnose na iste merne jedinice, ali određeni deo  $dA$  površine emituje ili prima odgovarajući fluks energije [139].

### 2.5.3. Emisivnost

Ako svaki objekat ili telo emituje toplotno zračenje na bilo kojoj temperaturi iznad 0 K, onda maksimalna snaga zračenja koja može biti emitovana od strane bilo kog objekta zavisi samo od temperature objekta što vodi do pojma toplotnog zračenja. Savršeni emiteri toplotnog zračenja su apsolutno crna tela koja imaju osobinu da apsorbiraju svako incidentno zračenje, bez obzira na talasnu dužinu i pravac, tako da nijedna površina ne može da emituje više energije od apsolutno crnog tela. Pošto su apsolutno crna tela savršeni apsorberi i emiteri, oni služe kao standard u radiometriji.

Međutim, ne postoji realan objekat koji bi mogao da emituje to maksimalno toplotno zračenje na datoj temperaturi. Dakle, stvarna emisija toplotnog zračenja bilo kojeg objekta može se izračunati množenjem zračenja apsolutno crnog tela sa emisivnošću  $\varepsilon$ . Emisivnost objekta podrazumeva odnos količine zračenja koja se zaista emituje sa površine i one koju emituje apsolutno crno telo pri istoj temperaturi. Na osnovu predhodno navedenog, jasno je da je  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , od teorijskog 0,00 (potpuno ne emituje, odgovara apsolutno belom telu) do takođe teoretskog 1,00 (potpuno emituje, odgovara apsolutno crnom telu). Emisivnost zavisi od sledećih parametara: materijala, strukture površine, ugla gledanja, geometrije, talasne dužine i temperature [139].

Vrsta materijala je glavni parametar koji utiče na brojnu vrednost emisivnosti. U zavisnosti od tehnika merenja, uzimaju se proseci u određenim uglovima i spektralnim opsezima, što je korisno u termografiji. Međutim, postoji pojednostavljena klasifikacija koja može pokazati razlike između metala i nemetala. Većina nemetalnih materijala koji su potrebni za praktičnu primenu u termografiji, kao što su koža, papir, kamenje, staklo itd., su sivi emiteri i imaju prilično visoku vrednost emisivnosti, čak iznad 0,8. Nasuprot, metali, a naročito polirani metali, imaju vrlo niske vrednosti emisivnosti, čak ispod 0,2. Takođe, na emisivnost utiču i talasna dužina, pa je dobro poznato da se svojstva materijala obično menjaju sa

temperaturom, tako da neki materijali, na primer Al oksid, pokazuju velike razlike u emisivnosti pri promeni temperature.

Za bilo koji materijal, emisivnost se može razlikovati zbog strukture površine i geometrije, što dovodi do toga da, za isti materijal postoje različite vrednosti emisivnosti. Ovaj efekat je vrlo čest kod metala, gde polirani metali mogu dostići veoma nisku emisivnost od 0,02, ali u slučaju da su površine hrapave, emisivnost može biti mnogo veća i čak dostići vrednosti iznad 0,8. Međutim, ako je površina metalnog dela izmenjena pod uticajem npr. oksidacije ili korozije, vrednost emisivnosti je 0,78 za jako oksidovane Cu, a za neke legure čelika sa hemijskim modifikacijama površine je vrednost emisivnosti čak 0,90. Zbog toga je potrebna kvantitativna analiza, što znači potrebno je znati tačnu temperaturnu razliku ovih materijala i onih koji se nalaze u okruženju a poznate su vrednosti njihove emisivnosti. Izmerena temperatura veoma zavisi od stvarne vrednosti emisivnosti.

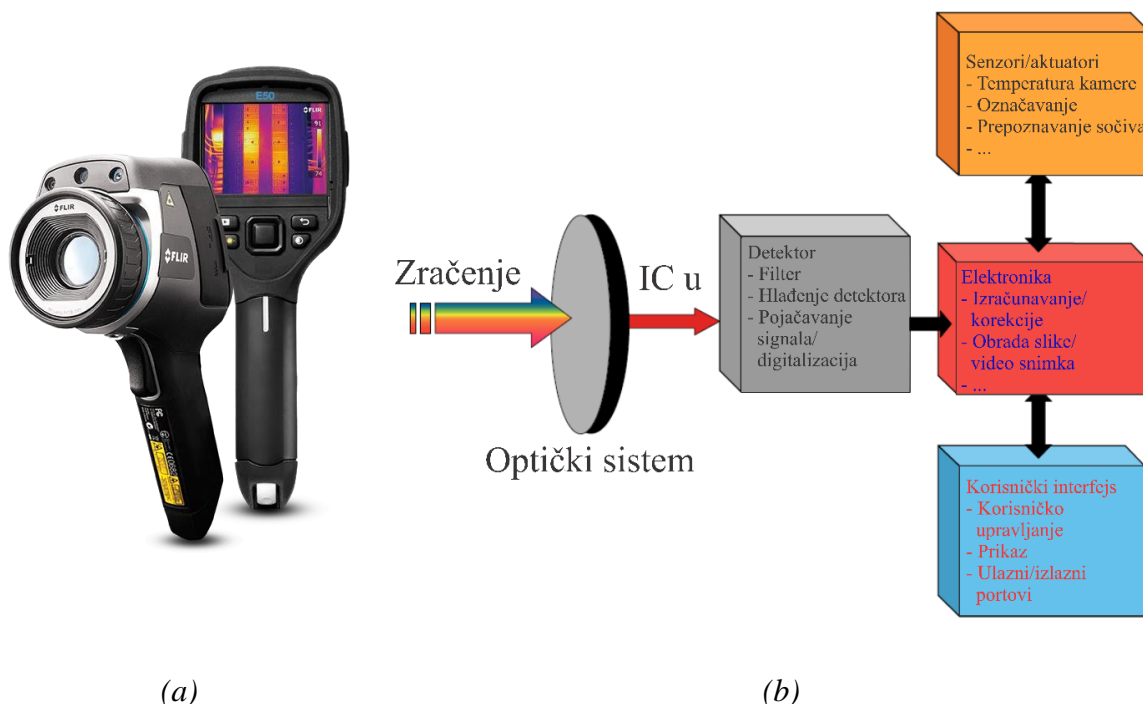
Objekat posmatran iz pravca upravnog u odnosu na njegovu površinu ( $\delta = 0^\circ$ ,  $\delta$  - ugao emisije) emitovaće više zračenja nego kada je posmatran pod kosim uglovima. To znači da vrednost emisivnosti zavisi od ugla posmatranja u odnosu na pravac normale na površinu. Zbog zavisnosti od ugla, emisivnost je različita u različitim tačkama materijala kod kojeg je ona, u pravcu normale ista u svim tačkama.

Za potrebe termovizijskog snimanja, treba istaći tri najvažnije karakteristike [168]:

- Odziv na temperaturu površine: Jasno je da je zračnost površine funkcija njene temperature. Kao rezultat toga, termovizijsko snimanje može se koristiti za merenje temperature objekta ili, što je još važnije, dvodimenzionalno mapiranje relativne ili stvarne distribucije temperature u sceni.
- Pasivno snimanje: Zračenje koje se koristi za generisanje termovizijske slike objekta, dolazi od samog objekta, tako da nema potrebe za spoljnim izvorom zračenja da bi se video objekat. Na osnovu toga, termovizijsko snimanje može obezbediti da se objekat vidi noću ili u uslovima slabe osvetljenosti. Štaviše, vidljivost određenih objekata koji mogu biti od posebnog interesa povećana je zbog njihove relativno visoke temperature u poređenju sa okruženjem.
- Vidljivost kroz dim i maglu: Budući da su vrednosti talasnih dužine deset do dvadeset puta veće od vrednosti talasnih dužina u vidljivom delu spektra, zračenje je podvrgnuto manjem rasipanju čestica u atmosferi. Kao rezultat toga, povećana je vidljivost kroz dim i maglu.

#### 2.5.4. Termovizijski sistemi

Glavna funkcija termovizijskih sistema (termovizijske ili infracrvene kamere) je pretvaranje infracrvenog zračenja u lažnu vizuelnu sliku u boji, tzv. termogram (Slika 2.22 (a)). Ova vizuelna slika treba da predstavlja dvodimenzionalnu distribuciju infracrvenog zračenja koje emituje objekat ili scena ali, za sistem za merenje temperature, vizuelna slika prikazuje temperature objekta.



**Slika 2.22** Termovizijska kamera FLIR E50 sa termogramom na ekranu (a) [169],

Blok dijagram sa glavnim delovima termovizijskog sistema (b) [139]

Stoga, glavni delovi termovizijske kamere su: (Slika 2.22 (b)) [139, 168]:

- Optički sistem, koji može da formira sliku spoljašnje scene koristeći zračenje u infracrvenom talasnom opsegu;
- Detektor ili detektori, koji mogu pretvoriti ovo zračenje u električne signale proporcionalne zračenju koje pada na njih;
- Obrada signala i slike, gde se slika sa ulaza obrađuje;
- Korisnički interfejs sa izlaznim portovima, upravljačkim portovima i prikazom slike, pomoću kog se može upravljati termovizijskim sistemom i prikazati slika na ekranu.

Neki sistemi zahtevaju mehanizam za skeniranje koji skenira termovizijsku sliku u pravilnom obrascu preko detektorskih elemenata, mada to većini savremenih sistema nije potrebno, jer koriste velike detekcijske nizove koji u potpunosti pokrivaju vidno polje sistema.

#### **2.5.4.1. Optički sistemi**

Optički sistemi koji se koriste u termovizijskim sistemima funkcionišu na isti način kao i oni kod sistema koji rade u vidljivom delu spektra. Glavna razlika između njih je u materijalima koji se koriste u optičkim sistemima, jer ti materijali moraju propuštati IC zračenje. Neki od materijala koji se upotrebljavaju kod termovizijskih sistema su silicijum (3-5  $\mu\text{m}$ ), germanijum (8-14  $\mu\text{m}$ ), cink sulfid, itd.

Važan aspekt materijala optičkih sistema kod termovizije je njihov relativno visoki indeks prelamanja u poređenju sa materijalima koja se koriste kod sistema za vidljivi deo spektra. Nepremazane površine imaju visoku reflektivnost, pa je generalno moguće postići visoki stepen optičke korekcije s manje elemenata nego što bi bilo potrebno u slučaju optičkog sistema za vidljivi deo spektra. Zbog toga postoje neke razlike u izboru reflektivnog premaza i zaštitnog filma nanetog na taj premaz. Visoka reflektivnost podrazumeva da se ovi materijali moraju koristiti sa antirefleksnim premazom, sa ciljem da se postigne dobar prenos kroz optički sistem i smanji nivo neželjenog svetlosnog zračenja izazvanog višestrukim refleksijama između optičkih površina [168].

#### **2.5.4.2. Detektor**

Infracrveni detektor ili detektorski sistem radi kao pretvarač sa zadatkom da infracrveno zračenje pretvara u električne signale. Uopšteno gledano, kvalitet ovog dela određuje performanse celog termovizijskog sistema. Postoje dve tehnologije infracrvenih detektora: termički detektori i fotonski detektori [139, 168].

Termički detektor se može posmatrati kao dvostepeni pretvarač, a zavisi od infracrvenog zračenja koji greje detektorski element. Najpre je incidentno zračenje apsorbovano radi promene temperature materijala. Zatim, odgovarajuća promena u nekom fizičkom svojstvu materijala utiče na stvaranje električne veličine kod termičkog detektora. Ovi detektori se koriste kod tzv. bolometarskih termovizijskih kamera. Njihov rad se zasniva na zavisnosti temperature od električnog otpora. Detektor se greje apsorpcijom elektromagnetnog zračenja a merena veličina je električni otpor metala ili poluprovodnika unutar detektora. Merenje daje informacije o intenzitetu incidentnog zračenja. Svaki termički otpornik se napaja konstantnom strujom, tako da promena temperature, od koje zavisi promena njegovog otpora, dovodi do proporcionalne promene napona. Zbog svog principa rada,



bolometri imaju problem sa kašnjenjem, a međusobno susedni pikseli mogu da utiču jedni na druge zbog provodnosti toplote. Rezolucija ovih kamera je obično 640x480 piksela sa veličinom piksela od  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  do  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ , a materijali su vanadijum oksid, silicijum i titanijum [11].

U fotonskom detektoru, se koristi unutrašnji fotoelektrični efekat za detekciju elektromagnetnog zračenja. Fotoni se apsorbuju iz infracrvenog zračenja i dovode do električne struje proporcionalne broju fotona, zbog unutrašnjeg fotoelektričnog efekta. Ovu vrstu detektora obično nazivamo fotonskim ili kvantnim detektorom i koriste se kod tzv. fotonskih termovizijskih kamera. Pošto na sobnoj temperaturi postoji mnogo nosača naelektrisanja koji se termički generišu, detektori se moraju intenzivno hladiti. Za detekciju infracrvenog zračenja i srednjetalasnog opsega, potrebne su temperature od oko 140 K, a iz dugotalasnog opsega čak 80 K. Hlađenje se vrši sa tečnim azotom ili električno pogonjenim Stirling motorima, koji su jeftiniji i operativno bezbedniji. U zavisnosti od primene, dostupni su različiti poluvodnički materijali, pa se čak neki materijali mogu kombinovati kako bi se formirao dvopojasni senzor, tako da se istovremeno mogu meriti dva različita spektralna opsega, što rezultira dvokanalnom slikom. Na primer, kombinacija galijum arsenida i aluminijum galijum arsenida može se koristiti za otkrivanje infracrvenog svetla srednje i duge talasne dužine, sa rezolucijom od  $640 \times 512$  piksela. Indijum antimonid se koristi kod kamera rezolucije  $1024 \times 1024$  piksela, a živa kadmijum telurid kod kamera rezolucije  $1280 \times 1024$  piksela. Za konstantnu kvantnu efikasnost, osetljivost kvantnih detektora raste sa talasnom dužinom, jer tada konstantnim intenzitetom dolazi do većeg protoka fotona [11].

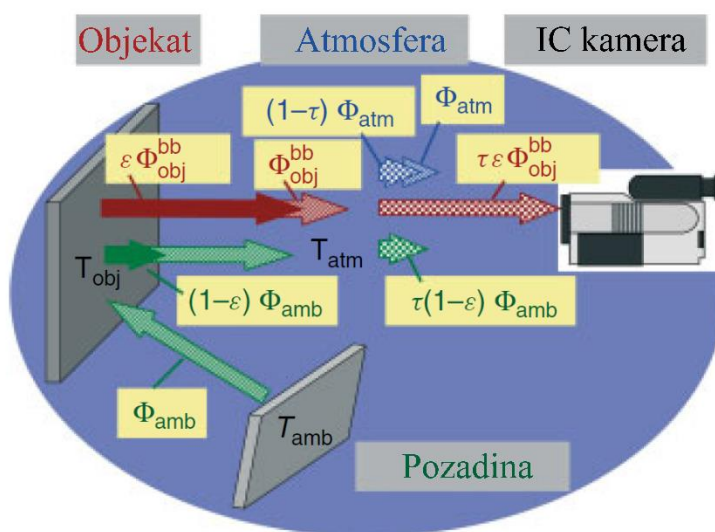
Opšte gledano, fotonski detektori su osetljiviji od termičkih. Međutim, za postizanje boljih performansi potrebno je ohladiti fotonske detektore, što je glavni faktor u projektovanju i primeni termovizijskih sistema koji koriste fotonske detektore. S druge strane, termički detektori ne zahtevaju hlađenje, pa su zato jeftiniji, ali neke vrste zahtevaju kontrolu njihove temperature kako bi se obezbedio rad u optimalnim uslovima. Prilikom odabira vrste detektora, potrebno je obratiti pažnju na talasne dužine u kojima imaju odziv, frekventni odziv, termičku osetljivost i prostornu rezoluciju koja može biti postignuta, zahteve za hlađenjem i prateću složenost i cenu, i pouzdanost [168].

### 2.5.4.3. Ekran

Slika koju generiše i obrađuje termovizijski sistem naziva se termogram i može se videti na ekranu koji je sastavni deo termovizijske kamere ili na spoljnom ekranu koji može biti ekran računara ili neki drugi ekran. Zbog praktičnosti, često su to integrisani LCD ekrani osetljivi na dodir i mogu biti monohromatski ili u boji [168]. Kod termovizijskih kamera koje poseduju ekran osetljiv na dodir, moguće je podešavati parametre preko ekrana. Većina termovizijskih kamera poseduje programe za kvantitativnu analizu, koji omogućavaju određivanje temperature u bilo kojoj tački na termogramu. Neke termovizijske kamere imaju mogućnost istovremenog snimanja i prikazivanja dve slike – iz vidljivog i infracrvenog dela spektra. Te slike mogu biti prikazane na ekranu jedna pored druge ili jedna preko druge [168].

### 2.5.4.4. Proces merenja

Proces merenja u termografiji opisan je radiometrijskim lancem koji uključuje sve fenomene koji utiču na detekciju zračenja koje neki objekat emituje na određenoj temperaturi (Slika 2.23).



**Slika 2.23** Proces merenja - radiometrijski lanac [139]

Radiometrijski lanac počinje emisijom toplotnog zračenja objekta na temperaturi  $T_{obj}$ . Za opis procesa merenja, potrebno je koristiti veličinu  $\Phi_i$ , koja predstavlja udeo snage zračenja u detektorskom signalu ( $i$  označava mehanizam udela). Ove veličine su povezane sa ostalim radiometrijskim veličinama, i one uključuju svojstva kamere kao što su vidno polje kamere, spektralni odziv detektora, propusnost optičkog sistema kamere, itd. Dalji navodi se odnose na neprozirna siva tela. Zavisnost snage zračenja  $\Phi_{obj}(T_{obj})$  od snage zračenja apsolutno crnog tela  $\Phi_{obj}^{bb}(T_{obj})$  je data sledećom jednačinom [139]:



$$\Phi_{obj}(T_{obj}) = \varepsilon \cdot \Phi_{obj}^{bb}(T_{obj}) . \quad (26)$$

Reflektivnost neprozirnog sivog objekta je  $r = 1 - \varepsilon$ . Objekat prima toplotno zračenje iz svoje okoline (ambijenta) pri temperaturi okoline  $T_{amb}$  i reflektovaće snagu zračenja datu sledećom jednačinom [139]:

$$r\Phi_{amb}(T_{amb}) = (1 - \varepsilon) \cdot \Phi_{amb}(T_{amb}) . \quad (27)$$

Temperatura okoline se obično označava kao reflektovana temperatura. U postupku merenja, zračenje nekog objekta mora dospeti u detektor. Dakle, snaga zračenja koju emituje i reflektuje objekat prema sistemu mora proći kroz atmosferu. Na ovom putu zračenje je obično oslabljeno jer mora proći kroz razne vrste materije, recimo atmosferu (ili gasove, tečnosti) i čvrste optičke materijale. To se može opisati množenjem udela snage zračenja od objekta i okoline sa atmosferskom propusnošću  $\tau_{atm}$ . Ako su u propuštanju kroz atmosferu dominantni samo gubici apsorpcije, tada će atmosfera na temperaturi  $T_{atm}$  takođe emitovati snagu zračenja koja je data u sledećoj jednačini [139]:

$$(1 - \tau_{atm}) \cdot \Phi_{atm}(T_{atm}) . \quad (28)$$

Zbog toga, sistem detektuje mešavinu snaga zračenja od objekta, okoline i atmosfere sa svih materijama, pa je totalna incidenta snaga zračenja na detektoru definisana kao [139]:

$$\Phi_{det} = \tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot \Phi_{obj}^{bb}(T_{obj}) + \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \Phi_{amb}(T_{amb}) + (1 - \tau_{atm}) \cdot \Phi_{atm}(T_{atm}) . \quad (29)$$

Emitovana snaga zračenja od objekta je data sledećom jednačinom [139]:

$$\Phi_{obj}^{bb}(T_{obj}) = \frac{\Phi_{det}}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} - \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \Phi_{amb}(T_{amb}) - \frac{(1 - \tau_{atm})}{\tau_{atm} \cdot \varepsilon} \cdot \Phi_{atm}(T_{atm}) . \quad (30)$$

Vrednost  $\Phi_{det}$  se određuje iz izmerenog signala senzora. Neophodni parametri za ispravnu procenu emitovane snage zračenja objekta  $\Phi_{obj}^{bb}(T_{obj})$  su: vrednost emisivnosti objekta  $\varepsilon$ , temperatura okoline  $T_{amb}$ , temperatura atmosfere  $T_{atm}$  i atmosferska propusnost  $\tau_{atm}$  (za proračun ovog parametra, ulazni parametri su atmosferska temperatura, relativna vlažnost i rastojanje od objekta). Temperatura objekta se određuje na osnovu snage zračenja objekta  $\Phi_{obj}(T_{obj})$  upotrebom kalibracione krive kamere. Očigledno je da je opisani radiometrijski lanac veoma osetljiv na bilo kakve spoljašnje uticaje, a to utiče na snagu zračenja koju detektuje kamera. Svaka varijacija emisivnosti objekta unutar izmerenog područja ili u pozadini sa promenom prostorne temperature zahteva korekciju izmerene snage zračenja za

sve piksele kamere. Potrebna tačnost korekcije povećava se sa smanjenjem emisivnosti objekta, odnosno povećanjem udela refleksije.

Pozadina nije samo izvor refleksne radijacije objekta, ali ona može služiti i kao referenca. Objekat se vidi ispred pozadine date temperature, a da li se objekt može razlikovati od pozadine zavisi od toplotnog kontrasta objekta i pozadine. U slučaju da objekat i pozadina imaju identične temperature, termovizijski sistem ne može identifikovati nijedan objekat, bez obzira na emisivnost. Međutim, dodatni optički sistem, filteri, prozori, ogledala, itd. mogu imati snažan uticaj na detektovanu snagu zračenja i njenu zavisnost od temperature objekta. Dakle, za ispravno merenje temperature, lanac zračenja sa dodatnim elementima mora biti analiziran [139, 168].

#### **2.5.4.5. Primena termovizijskih sistema**

Termovizijski sistemi, zbog svojih karakteristika, imaju široku primenu u različitim aplikacijama. Ovi sistemi se upotrebljavaju za:

- Monitoring, bezkontaktno ispitivanje, prediktivno-preventivno održavanje, ispitivanje bez razaranja [139, 168, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177],
- Merenje toplotnih gubitaka objekata i detekcija toplotnih mostova, vlage, defekata, određivanje termičkih performansi objekata i sistema u arhitekturi i građevinarstvu [139, 168, 170, 177, 178, 179, 180, 181, 182],
- Kontrolu kvaliteta u različitim procesima proizvodnje [139, 177, 183, 184],
- Meteorologiju, za detekciju i analizu ciklona, vetrova, oblaka, itd. [185, 186, 187],
- U medicini za dijagnostiku [139, 168, 177, 188].

Međutim, zbog svojih karakteristika, termovizijski sistemi se takođe koriste u detekcijama, u noćnim uslovima i različitim nadzornim primenama, na primer u detekciji i prepoznavanju ljudskih lica, pešaka, ljudi, različitih objekata (prepreke, vozila itd.), i dr. [189].

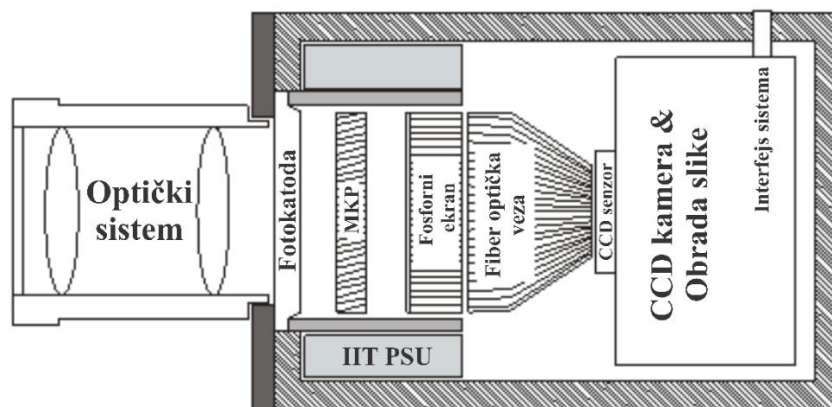
Primena termovizijske kamere je zastupljena i u robotici. Tako, autori u [190] su koristili termovizijsku kameru postavljenu na robotsku mobilnu platformu mSecurit™ kako bi detektovali ljude u realnom vremenu. Takođe, detekcija ljudi u unutrašnjim uslovima upotrebom termovizijske kamere na mobilnoj robotskoj platformi je prikazana u radu [191]. U drumskom saobraćaju, za potrebe detekcije vozila i pešaka, takođe je korišćena termovizijska kamera. Detekcija vozila primenom termovizijske kamere zasnovana na primeni njihove proporcionalnosti i veličine je prikazana u radu [192]. Sa druge strane, detekcija vozila primenom termovizijske kamere, zasnovana na razlikovanju područja refleksije toplotne energije gume na površini puta od ostalih područja, prikazana je u radu [193]. Sistem za

detekciju pešaka sa termovizijskom kamerom, koji je montiran na automobilu, zasnovan na detekciji objekata određene širine i visine, je prikazan u radu [194]. Stereovizijski sistem montiran na test vozilu, koji koristi dve termovizijske kamere za detekciju pešaka korišćenjem tri pristupa: detekcija toplog područja, detekcija ivica i proračunavanje dispariteta, je predstavljen u [195].

Sa druge strane, u železničkom saobraćaju, autori u [196] su koristili termovizijsku kameru postavljenu na krovu lokomotive i analizirali moguće opasne situacije u noćnim uslovima i lošim vremenskim uslovima, posebno kada neke prepreke mogu biti na koloseku. Zaključeno je da, korišćenjem ove kamere, vozač može prepoznati moguće objekte na železnici mnogo pre nego što se objekat osvetli farovima voza. Pored toga, primena termovizijske kamere FLIR SC655 sa rezolucijom od 640x480 piksela za detektovanje koloseka i objekata blizu koloseka, kao i obaveštavanje mašinovođe o prisustvu prepreke u oblasti ispred lokomotive, je prikazana u radu [197]. Detektovanje koloseka je izvršeno na osnovu geometrije scene, dok je za potrebe detekcije prepreka razvijen detektor anomalija koji detektuje objekte koji ne izgledaju kao kolosek, a nalaze se u sceni na mestu gde bi kolosek trebao biti.

## 2.6. Noćna vizija

Sistemi noćne vizije mogu koristiti različite vrste tehnologija da bi omogućili korisniku vidljivost u uslovima smanjene vidljivosti i/ili potpunog odsustva svetlosti. Osnovni princip rada ovog sistema je sakupljanje malih količina svetlosti prisutnih u okolini (npr. od zvezda, veoma udaljenog izvora svetlosti, itd.), koje su neprimetne i nedovoljne za oči čoveka, i pojačavanje te svetlosti do te mere kako bi korisnik mogao da posmatra sliku. Osnovni elementi sistema noćne vizije sa pojačivačem slike su: optički sistem koji se nalazi pre pojačivača slike, pojačavač slike, optički sistem i senzor spojeni na izlazni ekran pojačavača slike. Na slici 2.24 je prikazana šema sistema noćne vizije sa pojačavačem slike ICCD, koji koristi CCD senzor (engl. *Intensified CCD*).



HDSova ICCD

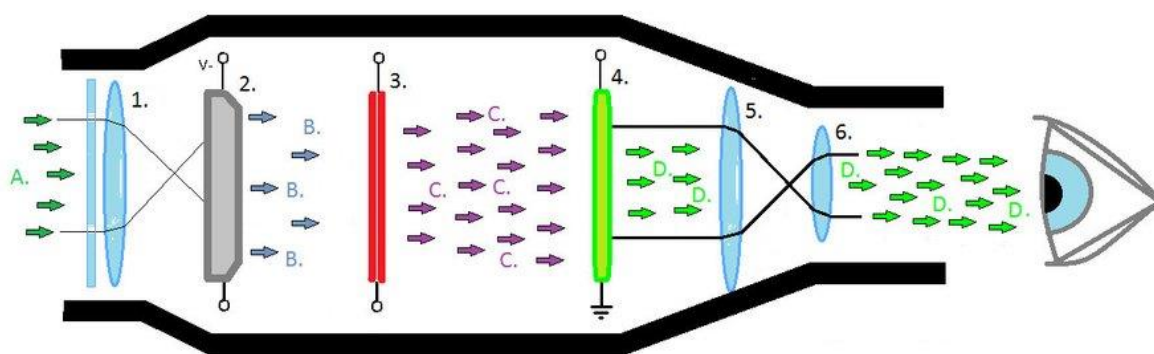
Slika 2.24 Šema ICCD kamere [198]

Zadatak optičkog sistema je da obezbedi dobro uvećanje objekta na određenim rastojanjima. Kada svetlost prođe kroz optički sistem, dolazi do pojačavača slike, čija je glavna funkcija umnožavanje dolaznih fotona, tj. pojačavanje dolaznog svetlosnog signala. To omogućava ICCD kameri da snima slike u uslovima ekstremne smanjene vidljivosti i/ili pri ekstremno kratkom vremenu ekspozicije do 200ps, kada je integral fluksa fotona tokom vremena ekspozicije vrlo mali. Slika koja se dobije na fosfornom ekranu, dalje se šalje CCD senzoru, koji je obrađuje i prikazuje korisniku na odgovarajući način.

Pojačavač slike (engl. *Image Intensifier – II* ili *I2*) zauzima značajno mesto u sistemima za osmatranje u situacijama slabe vidljivosti i male osvetljenosti, zbog svojih dobrih optičkih osobina i velike pouzdanosti. Oni su konstruisani kao kompaktne i robustne jedinice sa baterijskim napajanjem koje mogu da rade u širokom opsegu temperatura. Upravo elektronski sistem za napajanje omogućava sposobnost prilagođavanja pojačanja u odnosu na uslove osvetljenosti [199].

Pojačavač slike se sastoji od tri funkcionalne jedinice (Slika 2.25):

- fotokatoda, koja pretvara dolazne fotone u foto elektrone,
- mikrokanalna ploča (MCP) koja umnožava ove foto elektrone,
- fosforni ekran koji pretvara umnožene foto elektrone u fotone.



**Slika 2.25** Pojačavač slike: A. Fotoni, B. Elektroni, C. Multiplicirani elektroni, D. Fotoni;  
1. Sočivo, 2. Fotokatoda., 3. Mikrokanalna ploča, 4. Fosforni ekran,  
5. Fiber optički inverter, 6. Sočivo [200]

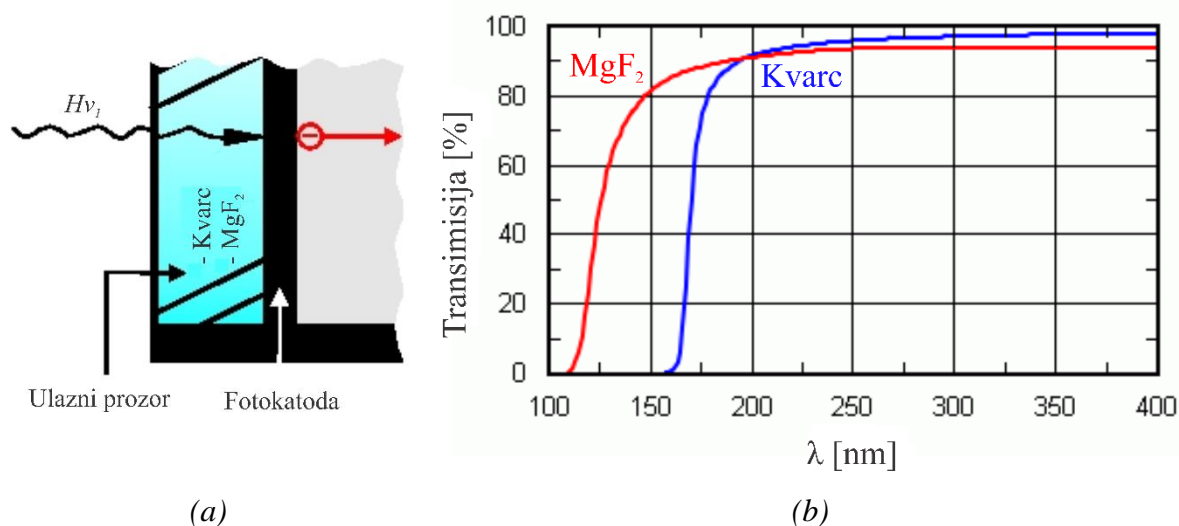
Ove funkcionalne jedinice su montirane jedna blizu druge u pomenutom redosledu. Osnovni princip rada pojačavača slike je sledeći: fotoni koji dolaze od izvora svetlosti padaju na fotokatodu, gde se vrši konverzija u elektrone; elektroni se multipliciraju u mikrokanalnoj ploči; zatim fosforni ekran konvertuje multiplicirane elektrone nazad u fotone, koji su vode do CCD senzora pomoću optičkog sistema.

Pojačavač slike obezbeđuje tzv. sposobnost propuštanja (engl. *gating capability*), odnosno ima funkciju „zatvarača” (poput funkcije mehaničkog zatvarača kod digitalne kamere). Ako je kamera visoke brzine u režimu propuštanja (engl. *gated „on”*), ulazno svetlo se pojačava, prenosi se na CCD senzor i sakuplja ga. U suprotnom, ako kamera nije u režimu propuštanja (engl. *gated „off”*), svetlo se ne prenosi na CCD senzor.

### 2.6.1. Fotokatoda

Fotokatoda se nalazi odmah iza ulaznog prozora bilo kog pojačivača slike, pa se dolazeće svetlo najpre susreće sa fotokatodom ICCD pojačivača slike. Fotokatoda pretvara dolazne fotone u elektrone kolizionom jonizacijom. Da bi se postigao maksimalan odnos signala i šuma u slikama, spektralna osetljivost fotokatode trebala bi biti dobro prilagođena svetlosnom spektru aplikacije. Na ovaj način se stvara maksimalni broj elektrona po dolaznom fotonu, tj. postiže se maksimalna integralna kvantna efikasnost. Fotokatoda pojačivača slike će, dakle, biti izabrana u skladu sa zahtevima aplikacije. Specifični sastav materijala fotokatode omogućava rad u više opsega elektromagnetnog spektra od ultraljubičastog, vidljivog do infracrvenog. Osetljivost fotokatode je takođe važno svojstvo prilikom izbora najprikladnije fotokatode za određenu aplikaciju [199].

Pre nego što fotoni pogode fotokatodu, oni moraju da prođu kroz ulazni prozor (Slika 2.26 (a)). Kvarc se koristi kao standardni materijal za prozor. Međutim, za aplikacije u ultraljubičastom delu spektra, može se koristiti  $MgF_2$  prozor. Faktori prenosa oba materijala prikazani su na slici 2.26 (b).

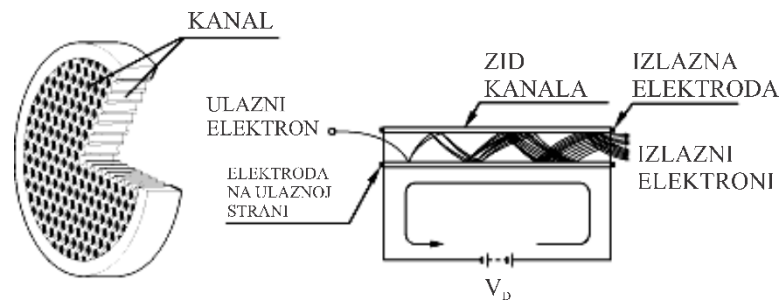


**Slika 2.26** Ulazni prozor i fotokatoda (a) [201],  
Dijagram faktora prenosa ulaznih prozora (b) [201]

### 2.6.2. Mikrokanalna ploča

Mikrokanalna ploča (MKP) (engl. *Microchannel Plate - MCP*) je posebno napravljena ploča u vidu sačaste strukture, koja ima nekoliko miliona nezavisnih kanala i svaki kanal deluje kao nezavisni multiplikator elektrona. MKP se sastoji od dvodimenzionalnog periodičnog niza staklenih kapilara (kanala) prečnika nekoliko mikrometara i dužine reda milimetra na međusobnim rastojanjima reda desetak mikrometara. Svaki kanal u MKP, ukoliko je adekvatno polarizovan, ispoljava sposobnost sekundarne emisije elektrona, što dozvoljava pojačanje elektronskog toka kroz kanal od nekoliko hiljada puta. Da bi se MKP iskoristila kao pojačavač slike, potrebno je izvršiti optoelektronsku konverziju fotona u elektrone pre MKP-a i elektro-optičku konverziju posle MKP-a, koju vrši fosforni ekran [199]. Prvu konverziju vrši fotokatoda i zbog toga su fotokatoda i MKP u bliskom kontaktu kako bi se obezbedilo da površinska raspodela elektrona odgovara ekvivalentnoj raspodeli fotona na fotokaturi. Ovako ubrzani elektroni ulaze u kanale MKP-a i izazivaju sekundarnu emisiju. Sekundarni elektroni se ubrzavaju električnim poljem dobijenog od napona na oba kraja MKP-a. Oni putuju svojim parabolničnim putanjama sve dok ne pogode površinu kanala, stvarajući tako više sekundarnih elektrona. Ovaj postupak se ponavlja mnogo puta duž kanala; a kao rezultat, ovaj kaskadni

proces daje oblak od nekoliko hiljada elektrona, koji izlaze na zadnju stranu ploče. Ako su dve ili više MKP u nizu, jedan ulazni događaj generiše impuls od  $10^8$  ili više elektrona na izlazu.

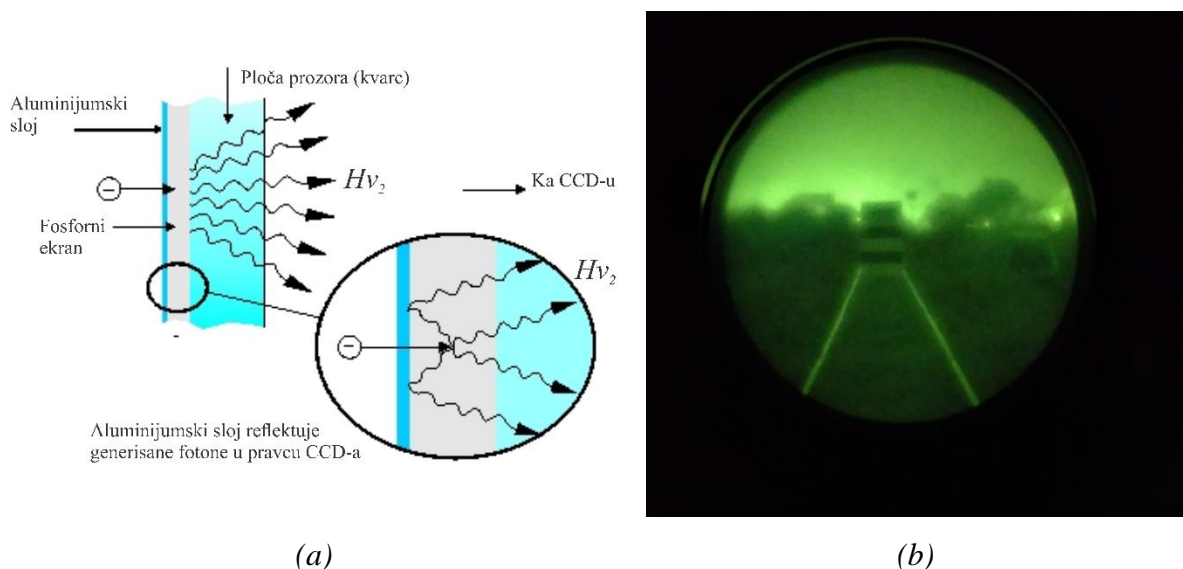


**Slika 2.27** Princip rada mikrokanalne ploče [201]

Mikrokanalne ploče imaju kombinaciju jedinstvenih svojstava poput visokog pojačanja, velike prostorne rezolucije i visoke vremenske rezolucije. Mogu se koristiti u velikom broju različitih primena, uključujući elektronsku spektroskopiju i mikroskopiju, masenu spektrometriju, astronomiju, studije molekularnog i atomskog sudara, fiziku klastera, itd.

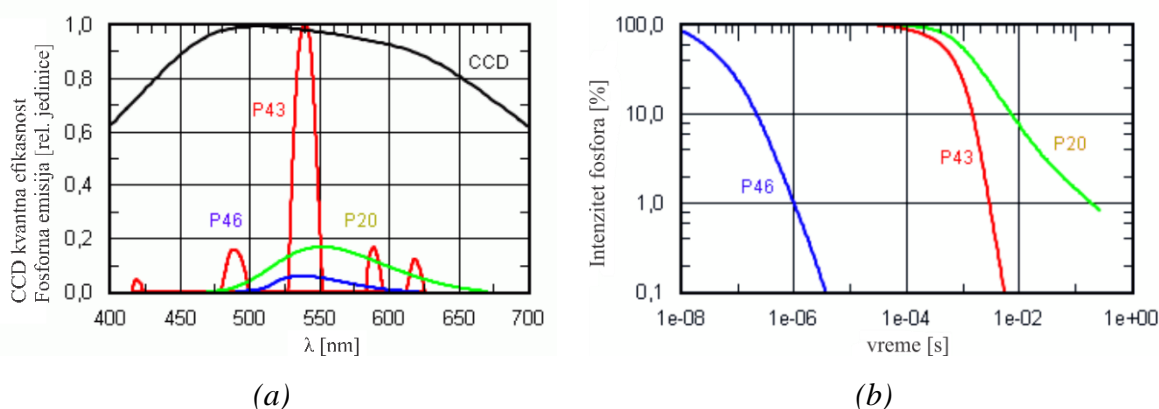
### 2.6.3. Fosforni ekran

Na izlazu iz MKP-a, dobija se elektronska struja, pa je potrebno izvršiti elektro-optičku konverziju. Tu konverziju vrši monohromatski fosforni ekran tako što pretvara lavinu elektrona, dobijenih od MKP-a, u fotone, odnosno emituje fotone ako ubrzani elektroni pogode materijal (Slika 2.28 (a)) [199]. Najčešća upotreba fosfornih ekrana su ekrani sa katodnom cevi koji su se koristili u starim televizorima i osciloskopima.



**Slika 2.28** Princip rada fosfornog ekrana (a) [199], Izgled pruge i prepreke na pruzi na fosfornom ekranu (b)

Tipični faktori konverzije koji se upotrebljavaju kod fosfornih ekrana su između 20 i 200 fotona po elektronu, u zavisnosti od vrste fosfora i kinetičke energije elektrona, tj. napona ubrzanja. Da bi se povećao broj fotona koji se emituje ka CCD senzoru, zadnja strana fosfora je presvučena aluminijumskim slojem koji reflektuje fotone u pravom smeru, kao što je prikazano na detalju na slici 2.28. Fosforni ekran je prikazan na slici 2.28 (b). Dostupno je nekoliko različitih vrsta fosfora koji se razlikuju u emitovanom spektru i vremenu raspadanja, tj. u trajanju fluorescencije, što je prikazano na slici 2.29.



**Slika 2.29** Kvantna efikasnost različitih fosfornih ekrana (a) [201],

Vremena raspadanja (trajanje fluorescencije) različitih fosfornih ekrana (b) [201]

Za pravilan izbor fosfornog ekrana, treba razmotriti efikasnost, vreme raspadanja fosfora i prostornu rezoluciju. Dva najčešće korišćena fosforna ekrana za pojačivače slike su P43 i P46. Fosforni ekran P43 ima veću efikasnost i veću prostornu rezoluciju, međutim, ima dugo vreme raspadanja. Za brze aplikacije, neophodno je brže raspadanje ekrana fosfora P46 da bi se izbegle slike „duhova” iz prethodne ekspozicije. Ipak, fosforni ekran P46 ima manju efikasnost i nižu prostornu rezolucija. U tabeli 2.2, dato je poređenje karakteristika fosfornih ekrana P43 i P46.

**Tabela 2.2** Karakteristike fosfornih ekrana P43 i P46 [201]

Fosforni ekran	P43	P46	
Efikasnost konverzije	200	95	Fotona po elektronu
Vreme raspadanja 100% => 10%	1500	0.2	$\mu$ s
Vreme raspadanja 100% => 1%	3200	20	$\mu$ s



Ukupno fotonsko pojačanje I2 je proizvod pojačanja fotokatode, MKP-a i ekrana i kreće se u rasponu od 40000 za pojačavače slike namenjene za civilno tržište do 80000 za najbolje uređaje. Pojačivač slike mora biti u stanju da radi u kompletnom rasponu osvetljenja fotokatode koje se kreće u rasponu od  $10^{-5}$  luksa što odgovara noćnim uslovima sa najmanje svetla (oblačno nebo bez Meseca) pa sve to  $10^5$  luksa što odgovara dnevnom svetlu. Ovaj veliki raspon od 10 dekada osvetljenosti predstavlja problem, jer zahteva da se optičko pojačanje reguliše kako bi se obezbedilo da MKP i ekran ne uđu u saturaciju kada se u potpunosti gube elementi slike. Takođe, svetlo velikog intenziteta može da ošteti fotokatodu ukoliko je ona polarizovana radnim naponom. U praksi se zahteva od pojačavača slike da poseduju konstantan osvetljaj ekrana reda nekoliko luksa u rasponu osvetljenja fotokatode od  $10^{-3}$  luksa do 200 luksa i taj zahtev se u industriji označava akronimom ABC (engl. *Automatic Brightness Control*). U praksi se ABC realizuje iz napajanja preko regulacije napona MKP čije elektronsko pojačanje zavisi od napona. Prilikom porasta osvetljenja fotokatode, smanjuje se napon MKP i tako održava konstantan osvetljaj ekrana. Dodatno, elektronsko napajanje mora obavljati i funkciju zaštite fotokatode (tzv. BSP – Bright Screen Protection) koja se realizuje podizanjem napona katode iz negativne radne vrednosti (nekoliko stotina volti) do blizu nule [199].

Prva generacija pojačavača slike, generacija 0, je razvijena tokom Drugog svetskog rata i koristila je krhke, vakuumске konvertere sa slabom osetljivošću i malim pojačanjem. To su bile jednostepene cevi gde se pojačanje slike dobijalo zahvaljujući ubrzavanju elektrona pomoću visokog napona, dok je te elektrone emitovala fotokatoda i oni su udarali u fosforni ekran. Za povećanje osvetljenja ulazne slike, korišćeni su fotokatoda S-1 (srebro – kiseonik – cezijum), elektrostatička inverzija i ubrzanje elektrona. Pojačavači slike 1. generacije su, u suštini, poboljšani pojačavači generacije 0. Početni eksperimenti sa novim fotokatodnim materijalima pokazali su da S-11 fotokatodu (cezijum-antimon) karakteriše izuzetno visoka kvantna efikasnost do 20%), ali samo u vidljivom opsegu. Stoga je postignuto samo neznatno poboljšanje svetlosne osetljivosti na nivo od  $80 \mu\text{A}/\text{lm}$  korišćenjem ove nove vrste fotokatoda. Otkrićem S-20 fotokatode (multialkalna fotodiode: natrijum-kalijum-antimon-cezijum) 1956. godine, postignuta je osetljivost u vidljivom i infracrvenom delu spektra, sa poboljšanom svetlosnom osetljivošću do  $200 \mu\text{A}/\text{lm}$ , a poboljšanim tehnikama elektrostatičke inverzije i ubrzanjem elektrona dostignuto je pojačanje od oko  $400 \text{ lm}/\text{lm}$  do oko  $800 \text{ lm}/\text{lm}$ . Pojačavače slike druge generacije karakterišu dobra rezolucija slike (25-30 lp/mm), širok dinamički opseg, nizak šum i jasna slika sa malo mrlja. Zbog ranije navedenih prednosti i niskih troškova proizvodnje, ovi pojačavači se još uvek proizvode, a sistemi noćne vizije se mogu naći

komercijalno na tržištu. Međutim, ovi pojačavači se veoma retko koriste za vojne primene zbog malog pojačanja svetlosti i značajne distorzije prisutne na slikama. Druga generacija pojačavača slike predstavlja značajnu prekretnicu u tehnologiji noćne vizije. Kao uređaji koji su kompaktni i malih dimenzija, imali su pojačanje od čak 30000 lm/lm a kasnije i više. Ovako veliko pojačanje sa smanjenim dimenzijama uređaja je postignuto iz četiri razloga: korišćenje mikrokanalne ploče, korišćenje nove S-25 fotokatode (ista je kao fotokatoda S-20, ali su korišćeni deblji slojevi materijala), korišćena je elektrostatička konverzija i, u pojačavač slike je integrisan elektronski modul sposoban ne samo da pojačava visokim naponom, već i da vrši automatsku kontrolu pojačanja i zaštitu od svetlih tačaka. Pojačavači slike treće generacije (Slika 2.30), su slični, prethodno opisanim, pojačavačima druge generacije, pri čemu se razlikuju materijali korišćeni za fotokatodu. U poređenju sa drugom generacijom, fotokatode korišćene u trećoj generaciji, imaju tri puta veću osetljivost na infracrveno zračenje [202].



*Slika 2.30* Komponente pojačavača slike (a) [203], Pojačavač slike treće generacije HD-1520 kompanije HARDER.digital GmbH (b) [204]

#### 2.6.4. Sistemi noćne vizije

Sistemi noćne vizije su razvijani za potrebe vojske, pa su do pre nekoliko decenija, bili proizvedeni samo za vojne potrebe. Iako se danas sistemi noćne vizije koriste i u civilne svrhe, vojna industrija je kao korisnik i dalje veoma važna za proizvođače, posebno za uređaje sa najboljim karakteristikama. Primena sistema noćne vizije može biti podeljena u tri glavna sektora: vojni, policijski i komercijalni (nauka, istraživanje, astronomija, lov, itd.), pri čemu se karakteristike samih sistema razlikuju u odnosu na sektor gde se koriste [202].

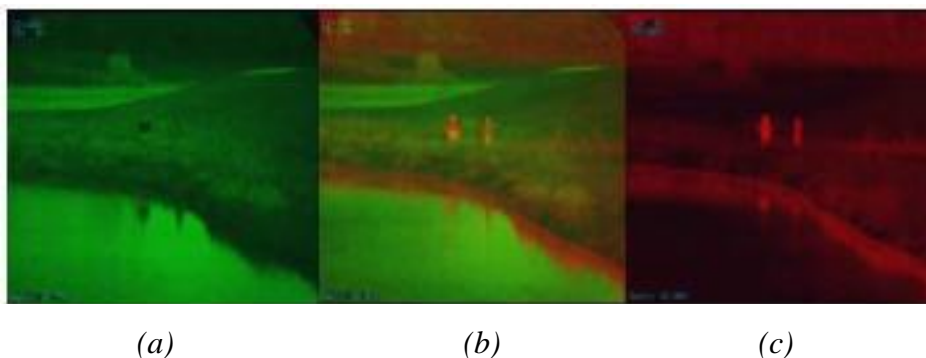
Savremeni sistemi noćne vizije se mogu, prema konstrukciji, podeliti u četiri grupe [202]: naočare, monokularni, osmatrački i dvogled.



**Slika 2.31** Sistemi noćne vizije: Naočare tip AN/AVS-9 (a), Monokularni Tarsius (b), Osmatrački Trident (c) [202]

Prve dve grupe sistema noćne vizije su uređaji sa širokim vidnim poljem od oko  $40^\circ$ , bez uvećanja, slično ljudskom vidu. Sistemi noćne vizije u formi naočara i dvogleda imaju mogućnost osmatranja korišćenjem oba oka, tako da ih koriste piloti, vozači i druge osobe koje imaju potrebu za 3D vizijom okruženja. Monokularni sistemi imaju nižu cenu, manju masu i dimenzije. Osmatrački sistemi i dvogledi imaju usko vidno polje od oko  $4^\circ$  do oko  $13^\circ$ . Osmatrački sistemi imaju uvećanje slike koju čovek opaža sa faktorom od 3 do 10 i, zbog toga, se montiraju na ručno oružje. Dvogledi su zapravo naočare sa većim optičkim objektivima i dužom žižnom daljinom i imaju uvećanje sa faktorom od 3 do 10, slično dvogledima za dnevne uslove.

Integrirani sistemi noćne vizije kombinuju izlazne slike sa dva ili više različitih tipa senzora noćne vizije u jednu kompozitnu (fuziranu) sliku kako bi iskoristili prednosti svake vrste senzora [205]. Najčešći oblik fuzije senzora koji se koristi za aplikacije za reagovanje u hitnim slučajevima je spajanje noćne vizije i termovizijskih sistema, kao što je prikazano na slici 2.32. Uopšteno, noćna vizija pruža sliku okolnog okruženja pod scenarijima slabog osvetljenja, dok termovizijski sistem omogućava identifikaciju objekata i ciljeva koji su od interesa termičkim prikazom objekata u okruženju. Na ovakav način se poboljšavaju mogućnosti detekcije u nepovoljni vremenskim uslovima. Ovi sistemi su veoma razvijeni za vojne potrebe [206].



*Slika 2.32 Fuzija slika: slika dobijena pomoću pojačavača slike (a), fuzirana slika (b), slika dobijena termovizijskom kamerom (c) [201]*

Još jedan sistem sa sposobnošću da proizvodi prave boje je kombinacija EMCCD kamere koja radi u vidljivom i infracrvenom opsegu EMCCD i termovizijske mikrobolometarske kamere koja radi u dugotalasnom infracrvenom opsegu [207]. Sistem može da radi u režimu pravih boja pri dnevnom osvetljenju do perioda kada je Mesec vidljiv kao jedna četvrtina, a ispod ovog nivoa svetlosti sistem može da funkcioniše u monohromatskom režimu. Ovakvi sistemi su relativno novi na tržištu i još uvek imaju visoku cenu.

Fuzija slika sa sistema noćne vizije i termovizijskog sistema može se postići optički ili digitalno. Optička fuzija se oslanja na optičku kombinaciju senzorskih slika i, u integrisanim sistemima, može se postići korišćenjem kombinatora snopa koji spaja slike sa dva senzora u jednu sliku. Digitalna fuzija koristi digitalnu obradu signala za kombinovanje slika.

### 3. Detekcija i prepoznavanje objekata na železničkoj pruzi

Autonomno upravljanje železničkim vozilima predstavlja veoma složen proces koji zahteva upotrebu više sistema kako bi se železnički saobraćaj odvijao na pravilan i bezbedan način. Međutim, mnogi bezbednosni izazovi na to utiču jer, na samoj železničkoj infrastrukturi, postoje konfliktne tačke, odnosno mesta na kojima se ukrštaju tokovi železničkog i drumskog saobraćaja. Prema Pravilniku, kolosek je zajednički naziv za sve vrste industrijskih koloseka i železničkih pruga koje se nalaze na javnoj železničkoj infrastrukturi i industrijskoj železnici [1]. Takođe, mesto ukrštanja železničke pruge i puta je mesto u naseljenom ili van naseljenog područja grada ili opštine, na mestu gde se presecaju osa koloseka železničke pruge i osa kolovoza puta, u nivou koloseka ili van nivoa koloseka, a koje je kao takvo planirano urbanističkim ili prostornim planom lokalne samouprave (grada ili opštine). Pružni prelazi su mesta gde se vrši ukrštanje železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, a može biti izvedeno na dva načina, i to [1]:

1. van nivoa koloseka, izgradnjom objekta drumske denivelacije, odnosno putnog podvožnjaka ili nadvožnjaka, pešačkog ili biciklističkog podhodnika ili nadvožnjaka ili pešačkih pasarela;
2. u nivou koloseka, izgradnjom putnih prelaza, sa odgovarajućom opremom ili uređajima za obezbeđenje saobraćaja, kao i na zajedničkom železničko-drumskom mostu sa kolovozom puta u nivou koloseka i po trasi koloseka.

S obzirom na samu kompleksnost, pružni prelazi jesu konfliktne tačke i opasna mesta, gde dolazi do čestih saobraćajnih nezgoda. Pružni prelazi u nivou koloseka su osvetljeni, obeleženi i opremljeni odgovarajućom opremom na propisan način. Međutim, često se formiraju neuređeni pružni prelazi, koji su nastali zbog različitih potreba ljudi. Ovakvi prelazi nisu projektovani, obeleženi i opremljeni odgovarajućom opremom ili uređajima za bezbedno odvijanje saobraćaja. Takođe, ovi prelazi nisu osvetljeni i mogu biti formirani na neobezbeđenim mestima železničke infrastrukture, odnosno delu koloseka, i predstavljaju opasna mesta.



Zbog toga, sa stanovišta bezbednog odvijanja saobraćaja, postojanje objekta na pružnom prelazu, odnosno na delu koloseka ili u okviru granice opasnog područja, predstavlja potencijalnu prepreku u bezbednom odvijanju železničkog saobraćaja, a može doći do usporavanja ili čak i potpunog zaustavljanja saobraćaja. Opasno područje na putnom prelazu je deo puta koji se nalazi 3 m pre prve šine na strani približavanja drumskog vozila putnom prelazu u nivou koloseka i 2 m posle poslednje šine na strani udaljavanja od putnog prelaza, na kojem se preklapaju ili dodiruju tovarni profili drumskih vozila i železničkih vozila [1].

Prema tome, za nesmetano i bezbedno odvijanje železničkog saobraćaja, ispravna i pravovremena detekcija prepreka je od ključne važnosti. Zbog toga je neophodno da jedan od glavnih elemenata autonomnog upravljanja železničkim vozilima bude i sistem za detekciju prepreka na delu železničke infrastrukture. Veoma važan element za pravovremenu i ispravnu detekciju objekata na koloseku i u okviru granice opasnog područja predstavlja vidljivost. Objekat koga nije moguće videti, nije ga moguće ni opaziti, odnosno detektovati kao prepreku, a ni po potrebi pravovremeno pristupiti akciji usporavanja i eventualnog zaustavljanja železničkog vozila.

Vidljivost predstavlja veoma složenu komponentu kod detekcije objekata, jer zavisi od mnogo faktora: osvetljenosti, okruženja, preglednosti, vremenskih uslova, itd., ali i zdravstvenog i psiho-fizičkog stanja mašinovođe. U železničkom saobraćaju, smanjena vidljivost je nemogućnost uočavanja signalnih znakova sa propisane daljine vidljivosti za određene brzine kretanja voza [208]. U dnevnim uslovima, vidljivost na većem delu koloseka je dobra, jer postoji prirodno osvetljenje čija je jačina zadovoljavajuća, pri čemu vremenski uslovi mogu imati određeni uticaj na smanjenje vidljivosti u vidu prisustva oblačnosti, magle, padavina, čestica zagađenja u vazduhu, itd. Međutim, u noćnim uslovima, vidljivost je dobra samo na delovima koloseka gde postoji dovoljna jačina veštačkog osvetljenja, a to su obeleženi i osvetljeni pružni prelazi, kao i u blizini objekata koji pripadaju železničkoj infrastrukturi. Prema Pravilniku, putni prelazi preko železničke pruge u naseljenim mestima se osvetljavaju uličnom rasvetom sa zaklonjenim izvorom svetlosti, dok se mesta ukrštanja železničke pruge i puta u nivou koloseka van naseljenog mesta, ako je to saobraćajno-tehnički opravdano za učesnike u drumskom saobraćaju, mogu osvetljivati noću zaklonjenim izvorom svetla [1]. Međutim, na mnogim projektovanim i izvedenim prelazima ne postoje tehnički uslovi za njegovo osvetljavanje, a posebnu opasnost predstavljaju neuređeni pružni prelazi jer, pored toga što nisu osvetljeni, mogu biti formirani na bilo kom delu koloseka, pa stoga nisu upisani u tehničku dokumentaciju. Kao i u dnevnim uslovima, dodatni doprinos smanjenju vidljivosti

u noćnim uslovima, svakako daju i loši vremenski uslovi. Stoga, čak i pored toga što vučno železničko vozilo poseduje uređaj za osvetljavanje i davanje čeonih signala - svetla i reflektor, u napred navedenim uslovima, vidljivost može biti izuzetno loša.

Iako detekcija prepreka na koloseku i u okviru granice opasnog područja zavisi od lica koje upravlja vučnim železničkim vozilom, odnosno mašinovođe, vidljivost je često ključni faktor koji određuje da li će detekcija biti pravovremena i ispravna. To za posledicu ima, pored drugih okolnosti (brzina kretanja, konstrukcija vučnog vozila, vozna kompozicija, itd.), veliki uticaj na zaustavni put železničkog vozila i celokupne kompozicije. Upravo takve okolnosti mogu dovesti do konkretne opasnosti ili saobraćajne nezgode.

Međutim, iako ljudski vid ima izvanredne sposobnosti, jedan od glavnih razloga otežane detekcije prepreka u noćnim uslovima od strane mašinovođe je to što ljudsko oko može da registruje samo svetlost iz vidljivog dela elektromagnetnog spektra, talasne dužine od oko 400-780 nm. Pored toga, ograničenja čoveka jesu njegovo trenutno psiho-fizičko i zdravstveno stanje, kao i uticaj okruženja, u kome se nalazi, na to stanje, ali i subjektivnost. S obzirom na takva ograničenja i trenutno stanje tehnike, javila se potreba za sistemom mašinske vizije koji će moći da izvršava zadatke detekcija prepreka na železničkoj infrastrukturi, i to u različitim uslovima, odnosno u onim uslovima u kojima čovek ne može ili su njegove mogućnosti za ispravan i pouzdan rad značajno smanjene.

Većina postojećih konceptualnih i tehničkih rešenja za detekciju prepreka na železničkoj infrastrukturi, koja su danas prisutna u literaturi i na tržištu, se mogu analizirati prema mestu postavljanja – stacionarni (nalaze se na železničkoj infrastrukturi) i pokretni (nalaze se na vučnom vozilu), i prema vrsti senzora koji su integrisani – aktivni, pasivni i mešoviti. Glavni nedostatak stacionarnih sistema je neophodnost njihovog postavljanja duž cele železničke infrastrukture što, u realnim uslovima, zahteva odgovarajuće resurse, tako da to nije moguće izvesti. Sa druge strane, trenutna rešenja koja se nalaze na vučnim železničkim i lakim šinskim vozilima, a koja koriste aktivne senzore, imaju značajna ograničenja u vidu detekcije na malim rastojanjima od senzora do objekta. Takođe, implementirani sistemi vizije, i pored velikog broja prednosti, rade u opsegu vidljive svetlosti, tako da je njihova upotreba moguća samo u dnevnim uslovima, dok u noćnim uslovima, na neosvetljenim delovima koloseka rezultati detekcije svakako nisu zadovoljavajući.

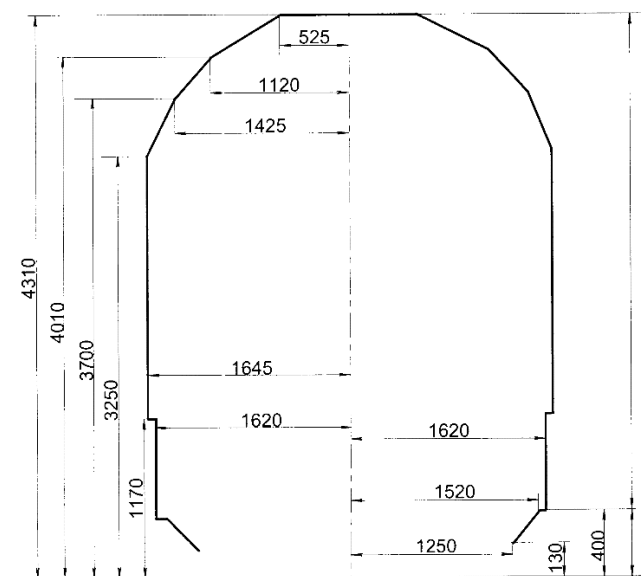
Sistem mašinske vizije, predstavljen u ovoj doktorskoj disertaciji, je koncipiran tako da se nalazi na prednjem čeonom delu vučnog železničkog vozila – lokomotive, kako bi bio pokretan i upotrebljiv duž cele železničke infrastrukture (Slika 3.1). Glavni cilj ovog sistema

je detekcija potencijalnih prepreka u odgovarajućem regionu od interesa (engl. *ROI- Region of Interest*). U postupku detekcije potencijalnih prepreka, potrebno je detektovati samo one objekte koji se nalaze na delu železničke infrastrukture gde mogu predstavljati potencijalnu prepreku i koji mogu dovesti do konkretne opasnosti i saobraćajne nezgode. Iako je opasno područje na putnom prelazu određeno Pravilnikom, to područje se odnosi na drumska vozila. Međutim, poseban fokus ovog sistema mašinske vizije jeste detekcija prepreka u noćnim uslovima na neobebeženim pružnim prelazima, odnosno na koloseku i u neposrednoj blizini koloseka.



*Slika 3.1 Koncept sistema za detekciju potencijalnih prepreka*

S obzirom na to da, na takvim prelazima, nije moguće prisustvo drumskih vozila, a okruženja u kojoj se nalazi železnička infrastruktura se mogu veoma razlikovati (urbana sredina, šuma, šiblje, itd.), region od interesa predstavlja, uzimajući u obzir tovarni profil (Slika 3.2) odnosno prostor koji je rezervisan za kretanje vozila [209], oblast koloseka (osno rastojanje između šina) od 1500 mm, i oblasti sa leve i desne strane koloseka – po 800 mm. Na taj način se, izuzimanjem objekata koji su van regiona od interesa, može značajno povećati kvalitet i tačnost detekcije.



*Slika 3.2 Tovarni profil [209]*



U sklopu razvijenog sistema mašinske vizije, nalaze se senzori koji se koriste u dnevnim uslovima, međutim ti senzori imaju nedostatke u vidu male robustnosti u uslovima smanjene vidljivosti i/ili potpunog odsustva svetlosti. S obzirom na potrebu detekcije prepreka u navedenim uslovima na delu železničke infrastrukture, odnosno koloseku, izabrani su termovizijski sistem i sistem noćne vizije. Termovizijski sistem (termovizijska kamera) koristi tehniku koja omogućava vizuelizaciju zračenja u infracrvenom delu elektromagnetnog spektra. Polazeći od pretpostavke da su temperature objekata od interesa različite od okruženja, na termogramu će se uočiti kontrast između objekata i okruženja. Na taj način je, posredstvom termovizijske kamere, omogućena vidljivost objekata, u uslovima u kojima čovek svakako ne bi mogao da ih uoči. Sistem noćne vizije je zasnovan na sakupljanju malih količina svetlosti prisutnih u okolini, koje su neprimetne i nedovoljne za oči čoveka. Prikupljena svetlost se pojačava do te mere kako bi čovek mogao da posmatra trenutnu scenu. Ovaj sistem obezbeđuje vidljivost objekata u noćnim uslovima, čak i u slučajevima kada temperature objekata i okruženja imaju iste ili približno iste vrednosti, pa se na termogramu ne može uočiti kontrast. Detaljan prikaz rada termovizijskog sistema i sistema noćne vizije je dat u poglavlju 2 ove doktorske disertacije.

U ovom poglavlju su predstavljeni termovizijski sistem i sistem noćne vizije za detekciju potencijalnih prepreka na koloseku. Sistemi su spregnuti sa razvijenim algoritmima koji vrše preprocesiranje, segmentaciju i fuziju niza frejmova – slika. Oba sistema vrše snimanje slike koja se zatim algoritmom obrađuje, da bi se izvršilo detektovanje potencijalnih prepreka u određenom regionu od interesa, i iste obeležile u izlaznoj slici. U okviru istraživanja, testiranje sistema je vršeno u realnim uslovima na terenu, kroz realne scenarije na četiri lokacije u različitim uslovima osvetljenja i vremenskim uslovima, u cilju ispitivanja robustnosti sistema i razvijenog algoritma. Odobrenje za vršenje svih eksperimenta je dato od strane nadležnog preduzeća „Infrastruktura železnice Srbije a.d.“, čija je jedna od delatnosti upravljanje javnom železničkom infrastrukturom. Istraživanje je vršeno u okviru projekta Horizon 2020 Shift2Rail projekta Smart Automation of Rail Transport – SMART.

### 3.1. Detekcija i prepoznavanje koloseka i objekata primenom termovizijskog sistema

U cilju razvoja pouzdanog i robustnog sistema mašinske vizije za detekciju potencijalnih prepreka, vršeni su inicijalni eksperimenti. Kroz niz eksperimenata, koji su realizovani u okviru projekta SMART, razmatrane su mogućnosti primene termovizijske kamere, kao i delovi železničke infrastrukture i okruženje, u cilju identifikacije faktora, koji bi mogli pozitivno ili negativno uticati na rad sistema. U cilju poređenja, inicijalni eksperimenti su realizovani u dnevnim i noćnim uslovima, na teritoriji grada Niša i to na dve lokacije:

- putnom prelazu u gusto naseljenom delu grada, i
- putnom prelazu u industrijskoj zoni grada.

Za potrebe inicijalnih eksperimenata, korišćeni su uređaj za merenje količine svetlosti luksmetar (Slika 3.3) i termovizijska kamera FLIR E50 (Slika 3.4). Luksmetar Extech HD450 poseduje opseg merenja od 0 do 400000 luksa sa rezolucijom od 0.1 luksa. Ovaj uređaj koristi kao senzor količine osvetljenja preciznu silikonsku foto diodu i filter spektralnog odziva, tako da može vršiti merenja sa tačnošću od  $\pm 5\%$ . Dimenzije uređaja su  $170 \times 80 \times 40$  mm, a masa 390 g [210]. Termovizijska kamera FLIR E50 ima rezoluciju od  $240 \times 180$  piksela, tako da je ukupan broj piksela 43200. Vidno polje (engl. *field of view (FOV)*) kamere je  $25^\circ \times 19^\circ$ , a spektralni opseg je 7,5 do 13 $\mu$ m. Osetljivost kamere je manja od  $0,05^\circ\text{C}$  na temperaturi okoline od  $30^\circ\text{C}$ , dok je tačnost očitavanja merenja  $\pm 2^\circ\text{C}$  ili  $\pm 2\%$  unutar temperaturnog opsega od  $-20^\circ\text{C}$  do  $650^\circ\text{C}$ . Učestalost frejmova je 60 Hz, a operativno vreme 4 sata. Ova kamera ima mogućnost snimanja digitalne i termovizijske slike iste scene u vremenskom razmaku od nekoliko sekundi. Dimenzije kamere su  $246 \times 97 \times 184$  mm a masa je 0,825 kg [140, 211].

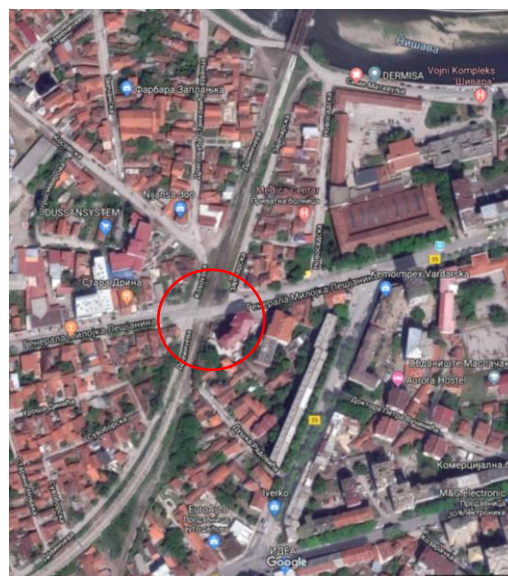
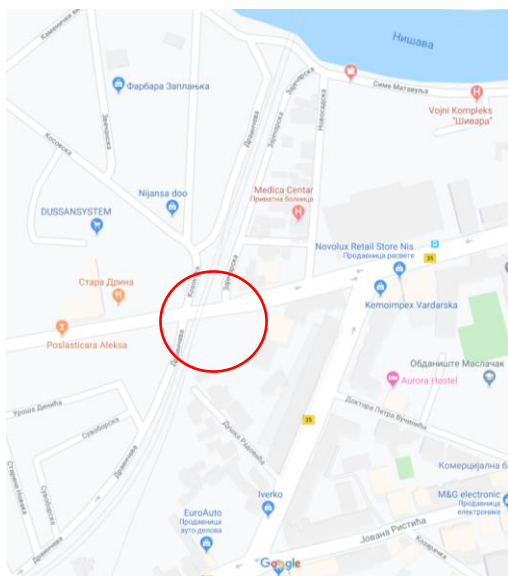


Slika 3.3 Luksmetar Extech HD450



Slika 3.4 Termovizijska kamera FLIR E50 [211]

Putni prelaz u gusto naseljenom delu grada se nalazi na ukrštanju ulice Generala Milojka Lešjanina i magistralne pruge Beograd-Niš (označeno crvenim krugovima na slici 3.5). Eksperimenti su vršeni u toku 2016. godine, na delu pruge između železničkih stanica Niš i Crveni Krst, u smeru ka Beogradu. Na tom delu, pruga je dvokolosečna i elektrificirana, i deo je Evropskih pruga E70 i E85. Putni prelaz je osvetljen, obeležen i opremljen odgovarajućom opremom na propisan način. Ova lokacija je izabrana zbog gustine saobraćaja, kao i postojanja stambenih i poslovnih objekata u neposrednoj blizini prelaza, koji mogu uticati na dodatnu osvetljenost putnog prelaza u noćnim uslovima.



**Slika 3.5** Lokacija putnog prelaza u gusto naseljenom delu grada

U dnevnim uslovima, na ovom putnom prelazu, luksmetrom je izmerena količina svetlosti od 7630 luksa, pri pretežno oblačnom vremenu i temperaturi od 2°C (Slika 3.6). Duž koloseka, izmerena je nešto veća količina svetlosti, u proseku 8080 luksa, što je posledica toga da se u blizini putnog prelaza nalazi višespratni stambeno-poslovni objekat, što utiče na smanjenje količine svetlosti.



**Slika 3.6** Putni prelaz u dnevnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada

Korišćenjem termovizijske kamere FLIR E50, vršena su snimanja koloseka na lokaciji, i to u prethodno navedenim dnevnim i meteorološkim uslovima. Cilj snimanja je bio razmatranje mogućnosti upotrebe termovizijske kamere za detekciju prepreka u regionu od interesa. Rezultati snimanja termovizijskom kamerom (digitalna slika i termogram) su prikazani na slici 3.7. Na termogramu (termovizijskoj slici) se jasno uočava temperaturna razlika između koloseka, okruženja i drugih delova infrastrukture (pragova, tucanika-kamena, itd.), gde je kolosek značajno „hladniji” od delova infrastrukture koji imaju približno istu temperaturu. Sa druge strane, stambeni i poslovni objekti u okolini su značajno „topliji” od svih delova železničke infrastrukture.



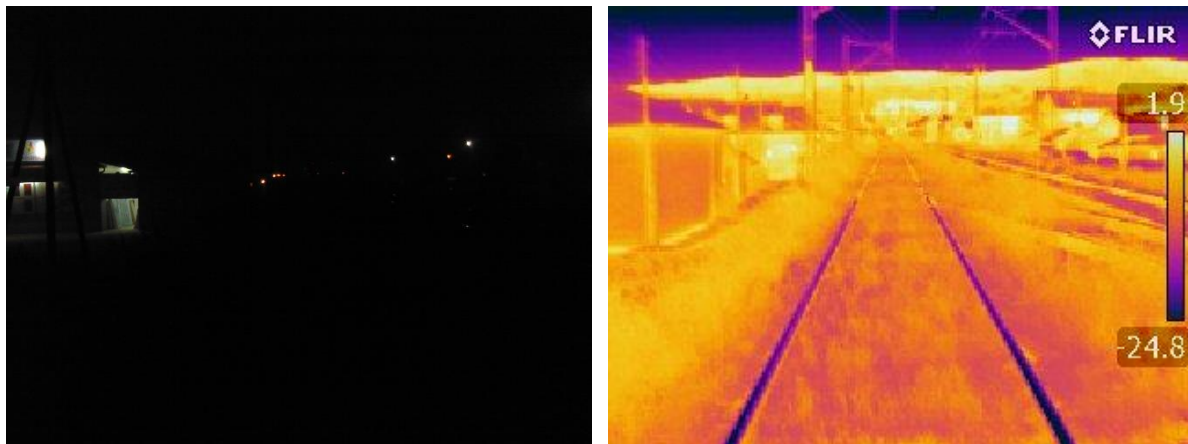
*Slika 3.7 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u dnevnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada: digitalna slika (a), termogram (b)*

Međutim, u noćnim uslovima, iako je putni prelaz osvetljen na propisan način, izmerena je količina svetlosti od 6,7 luksa, pri oblačnom vremenu i temperaturi od 0°C (Slika 3.8). Duž koloseka, izmerena je nešto manja količina svetlosti, u proseku od 0,5 – 1,3 luksa, jer van putnog prelaza osvetljenje potiče od okolnih objekata i ulične rasvete.



*Slika 3.8 Putni prelaz u noćnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada*

Takođe, na istoj lokaciji su i u noćnim uslovima vršena snimanja koloseka termovizijskom kamerom FLIR E50. Rezultati snimanja termovizijskom kamerom su pokazali da, u noćnim uslovima, na digitalnoj slici nije moguće uočiti nijedan deo infrastrukture (Slika 3.9 (a)). Sa druge strane, na termogramu se može videti da postoji još izraženija temperaturna razlika između koloseka, okruženja i drugih delova železničke infrastrukture (Slika 3.9 (b)). Tako, kao i u dnevnim uslovima, kolosek je „hladniji” od delova infrastrukture koji imaju približno istu temperaturu, a okolni objekti su „topliji” od svih delova železničke infrastrukture.

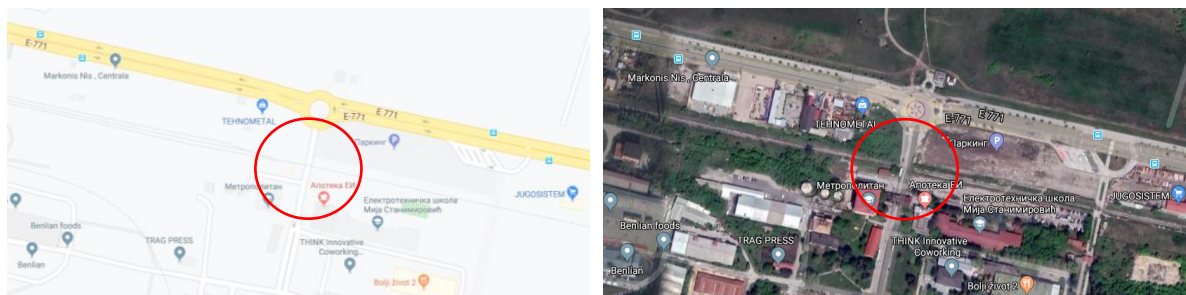


(a)

(b)

**Slika 3.9** Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada: digitalna slika (a), termogram (b)

Druga lokacija, korišćena za inicijalne eksperimente, je putni prelaz u industrijskoj zoni grada, kod kompleksa nekadašnje Elektronske industrije Niš, u blizini Elektrotehničke škole „Mija Stanimirović” (Slika 3.10). Ovaj putni prelaz se nalazi na ukrštanju lokalnog puta i magistralne pruge Niš-Dimitrovgrad. Eksperimenti su vršeni na delu pruge između železničkih stanica Niš i Niška Banja, u smeru ka Dimitrovgradu. Na tom delu, pruga je jednokolosečna i nije elektrificirana, i deo je Evropskih pruga E70. Putni prelaz je osvetljen, obeležen i opremljen odgovarajućom opremom na propisan način. Međutim, ova lokacija je izabrana zato što u neposrednoj blizini prelaza ne postoje objekti koji bi značajno uticali na dodatnu osvetljenost putnog prelaza i koloseka u noćnim uslovima.



**Slika 3.10** Lokacija putnog prelaza u industrijskoj zoni grada

Kao i na prvoj, tako su i na ovoj lokaciji vršeni eksperimenti u toku 2016. godine, u dnevnim i noćnim uslovima. Međutim, kako bi se izvršila kompletnija analiza mogućnosti upotrebe termovizijske kamere, na ovom putnom prelazu su eksperimenti vršeni u pogodnijim vremenskim uslovima, u odnosu na prvu lokaciju. Tako, u dnevnim uslovima, pri sunčanom vremenu i temperaturi od 7°C, na putnom prelazu je izmerena količina svetlosti od 14570 luksa, pri čemu, zbog daljine okolnih objekata, količina svetlosti nije varirala za više od 1% (Slika 3.11).



**Slika 3.11** Putni prelaz u dnevnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada

U dnevnim uslovima, iako je vreme bilo sunčano, rezultati snimanja termovizijskom kamerom FLIR E50, pokazuju da se na termogramu mogu uočiti temperaturne razlike koloseka, okruženja i drugih delova infrastrukture (Slika 3.12). Kao i na prvoj lokaciji, kolosek je značajno „hladniji” od ostalih delova infrastrukture koji imaju približno istu temperaturu. Objekti, koji se nalaze u široj okolini koloseka, su „topliji” od svih delova železničke infrastrukture.



(a)

(b)

**Slika 3.12** Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u dnevnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada: digitalna slika (a), termogram (b)

Sa druge strane, u noćnim uslovima je na putnom prelazu izmerena količina svetlosti od 6,8 luksa, pri vedrom vremenu i temperaturi od 6°C, a duž koloseka u proseku od 0,5-1 luksa jer nema objekata u njegovoj blizini (Slika 3.13).



**Slika 3.13** Putni prelaz u noćnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada

Snimanjem napred navedenom termovizijskom kamerom, dobijeni su rezultati prikazani na slici 3.14. Kao što je i očekivano, na digitalnoj slici nije bilo moguće uočiti ni delove železničke infrastrukture, a ni objekte u blizini, dok je na termovizijskoj slici primećena temperaturna razlika, pa je kolosek „hladniji” od ostalih delova infrastrukture koji imaju približno istu temperaturu, ali i od okolnih objekata koji su napušteni.



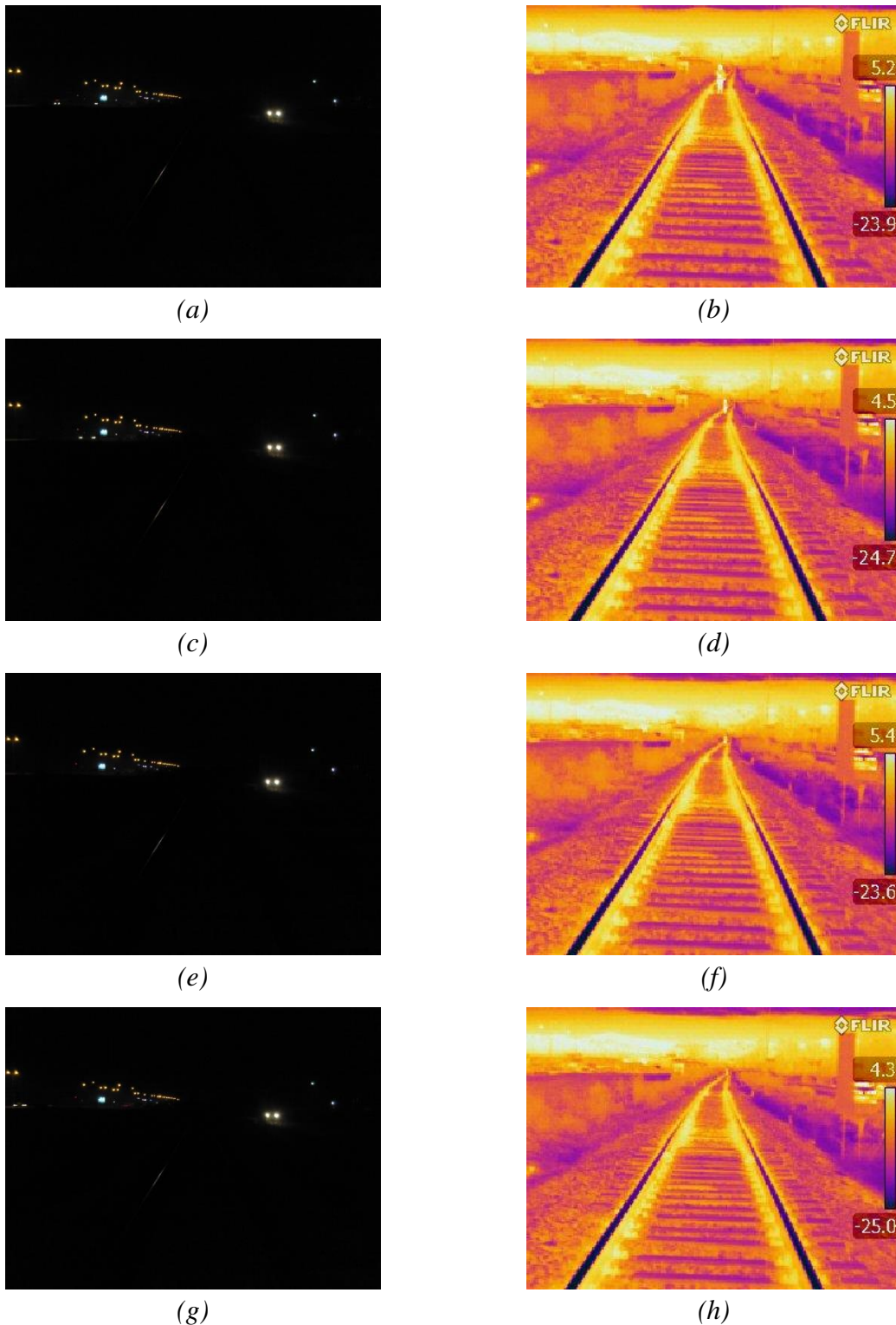
(a)

(b)

**Slika 3.14** Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada: digitalna slika (a), termogram (b)

Međutim, bilo koji objekat koji se nalazi na koloseku predstavlja potencijalnu prepreku za bezbedno odvijanje železničkog saobraćaja. Zbog toga su vršeni eksperimenti u noćnim uslovima, i to u realnim scenarijima sa objektom-čovekom na koloseku bez dodatnog osvetljenja usmerenog ka koloseku, kako bi se utvrdila njegova vidljivost korišćenjem digitalne i termovizijske kamere. U okviru 10 eksperimenata, objekat se nalazio na različitim rastojanjima od termovizijske kamere u rasponu od 50-500 metara. Rezultati su pokazali da nije moguće koristiti digitalnu kameru za ovu namenu. Sa druge strane, na termogramu je primetno da je objekat-čovek „topliji” od koloseka i dela okruženja, odnosno da se može uočiti na koloseku pomoću termovizijske kamere. Ipak, zbog karakteristika termovizijske kamere, jasno uočavanje je bilo moguće na rastojanjima od 50 m, 100 m i 150 m, dok je na većim rastojanjima, vidljivost objekta manja, pa ga nije bilo moguće jasno uočiti (Slika 3.15).





*Slika 3.15 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima sa objektom na koloseku— lokacija u industrijskoj zoni grada: objekat na rastojanju od 50m - digitalna slika (a), termogram (b); objekat na rastojanju - od 100m digitalna slika (c), termogram (d); objekat na rastojanju od 150m - digitalna slika (e), termogram (f); objekat na rastojanju od 200m - digitalna slika (g), termogram (h)*

Analizom rezultata snimanja termovizijskom kamerom FLIR E50 na dve lokacije u gradu Nišu, u različitim meteorološkim uslovima i uslovima osvetljenja, može se primetiti da je vidljivost na železničkoj infrastrukturi u dnevnim uslovima dobra. Međutim, u noćnim uslovima, na delu koloseka koji nije osvetljen, na obe lokacije je vidljivost veoma loša, što ima za posledicu da, na digitalnim slikama, nije moguće uočavanje delova železničke infrastrukture, a ni objekata na koloseku. Međutim, u istim meteorološkim uslovima i uslovima osvetljenja na obe lokacije, na termovizijskim slikama se, zbog temperaturne razlike, uočavaju kontrasti između koloseka i okruženja, i objekta na koloseku, koloseka i okruženja. Upravo prisustvo ovih kontrasta omogućava korišćenje termovizijske kamere u noćnim uslovima, kako bi se izvršila detekcija potencijalnih prepreka u regionu od interesa.

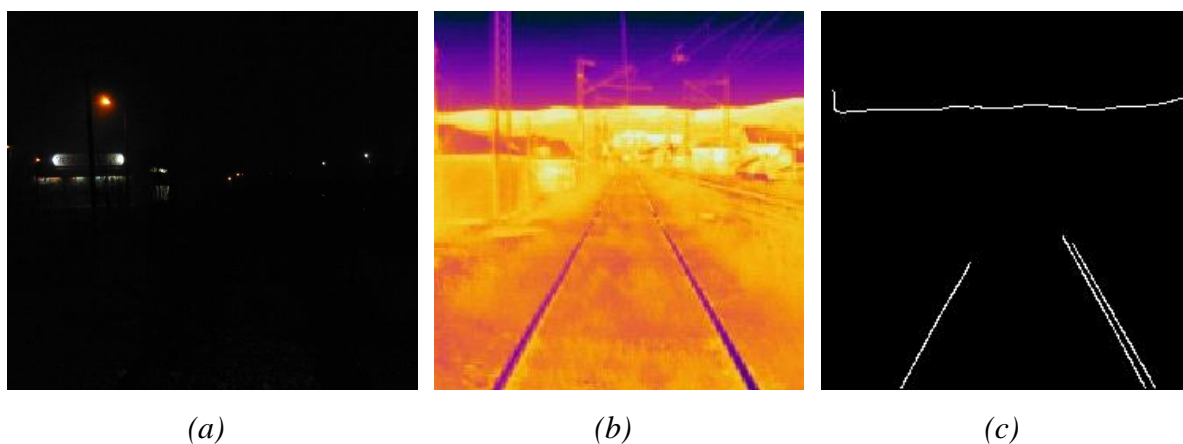
### **3.1.1. Detekcija i prepoznavanje koloseka primenom termovizijskog sistema**

Veoma važan segment za ispravnu detekciju potencijalnih prepreka jeste određivanje regiona od interesa. S obzirom da region od interesa, kao što je navedeno, obuhvata oblast samog koloseka i oblasti sa njegove leve i desne strane, od ključne važnosti je detektovati i lokalizovati kolosek u trenutnoj sceni. Kako se detekcija koloseka vrši u noćnim uslovima, korišćena je termovizijska kamera, odnosno termovizijske slike.

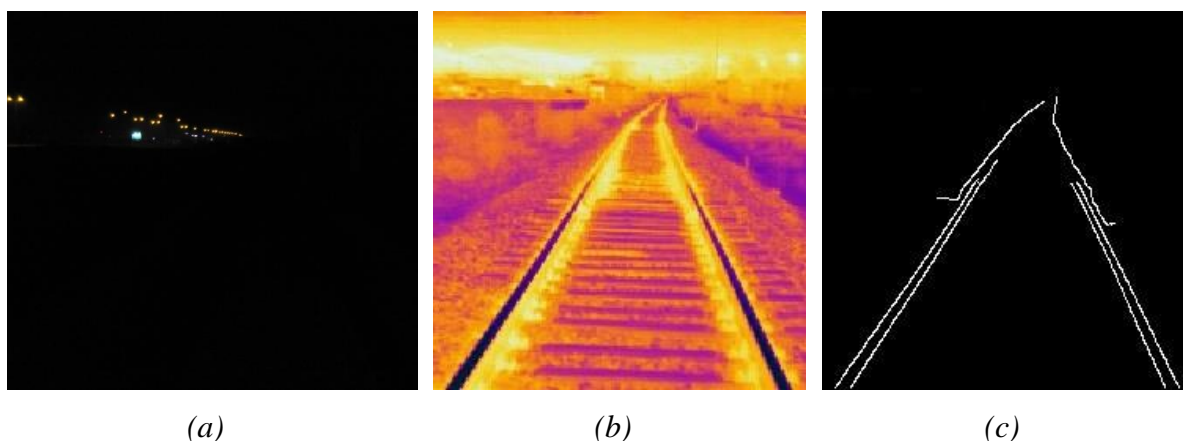
Određivanje regiona od interesa na termovizijskim slikama, tj. nizu frejmova, je vršeno primenom razvijenog algoritma, zasnovanog na segmentaciji. Osnova za to je zapravo raspodela temperatura na termovizijskoj slici, gde svaki piksel odgovara određenoj vrednosti temperature, pri čemu na grayscale slici tamnije nijanse odgovaraju nižoj temperaturi dok oblasti koje čine svetliji pikseli odgovaraju regionima sa višom temperaturom. Razmatrajući raspodelu temperatura na termovizijskoj slici, uočena je razlika između koloseka i njegove neposredne okoline. Pored toga, postoji stvarna geometrijska granica između koloseka i okoline. Zato se kolosek može smatrati posebnim regionom u kome se nalaze pikseli čiji se atributi, odnosno vrednosti nivoa intenziteta, značajno razlikuju od okoline. To znači da se mogu detektovati granice tog regiona na osnovu lokalnih naglih promena intenziteta. Prema tome, kako bi se odredio region od interesa, potrebno je izvršiti detekciju i lokalizaciju koloseka. Za tu namenu se mogu koristiti metode segmentacije zasnovane na ivicama, odnosno metode detekcije ivica.

Kako bi se utvrdila mogućnost primene metoda detekcije ivica, postupak detekcije koloseka je izvršen na setu termovizijskih slika snimljenim kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima u okviru inicijalnih eksperimenata. Za tu namenu je razvijen i korišćen algoritam

zasnovan na detekciji ivica, u koji je integriran Canny detektor ivica, pri čemu je prag određen iterativno. Rezultati detekcije koloseka na obe lokacije su prikazani na slikama 3.16 i 3.17.



**Slika 3.16** Detekcija koloseka na lokaciji u gusto naseljenom delu grada: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c)

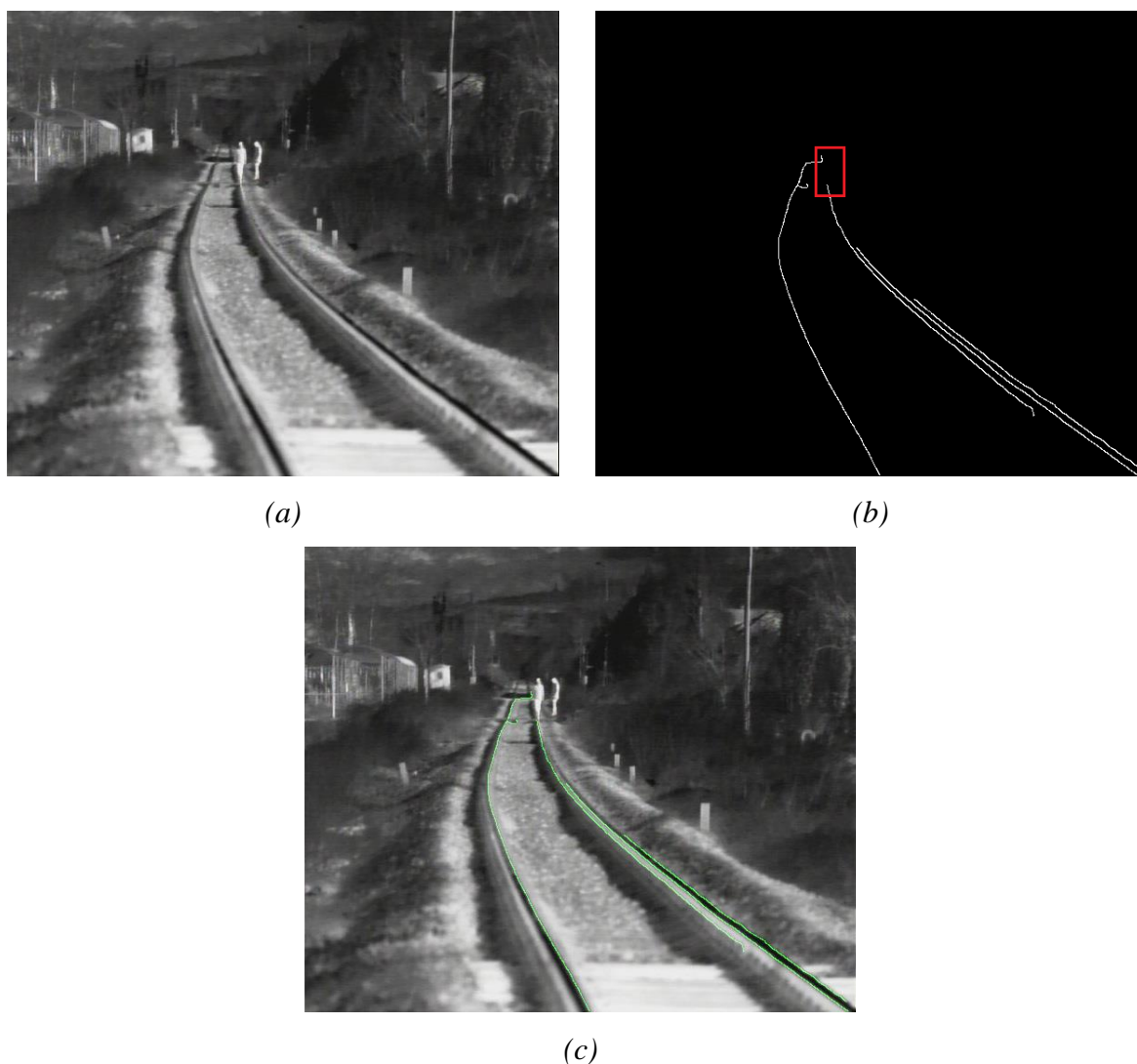


**Slika 3.17** Detekcija koloseka na lokaciji u industrijskoj zoni grada: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c) [212]

Na osnovu prikazanih rezultata, može se zaključiti da metode detekcije ivica mogu biti korišćene za detekciju i lokalizaciju koloseka. Međutim, kvalitet detekcije ivica, a time i koloseka, zavisi, pored ostalih faktora, i od kvaliteta snimljene slike. Prema tome, potrebno je koristiti termovizijsku kameru sa odgovarajućim objektivom, a u cilju tačnije i kvalitetnije detekcije koloseka.

U okviru niza eksperimenata realizovanih početkom 2017. godine, kao deo projekta SMART, na terenu su vršena testiranja nekoliko objektivna, kako bi se odabralo optimalno rešenje koje će obezbediti kvalitetne termovizijske slike u procesu detekcije koloseka, a zatim i potencijalnih prepreka u regionu od interesa. U okviru jednog od eksperimenata, na lokaciji

u industrijskoj zoni grada Niša, sa objektivom sa fiksnom žižnom daljinom od 100 mm, snimljen je set termovizijskih slika u noćnim uslovima, pri vedrom vremenu i temperaturi od 10°C i relativnoj vlažnosti vazduha od 85 %. Jedna od snimljenih specifičnih scena je prikazana na slici 3.18 (a) [161]. U sceni se nalaze pravi delovi koloseka ali i oni koji imaju određeni radijus krivine, čije geometrijske karakteristike ne mogu biti predvidive. Takođe, može se primetiti da kolosek nema konstantni ili potpuno isti nivo sive boje u celoj sceni, a u nekim delovima nema jasnih granica između koloseka i okoline. Upravo ovo prikazuje realnu situaciju na terenu, a napred navedene činjenice mogu otežati sam postupak detekcije i lokalizacije koloseka.



*Slika 3.18 Detekcija koloseka na lokaciji u industrijskoj zoni grada-kamera sa objektivom: termovizijska slika (a), detektovan kolosek (b), detektovan kolosek prikazan zelenom bojom na termovizijskoj slici (c) [161]*

Za detekciju i lokalizaciju koloseka, korišćen je prethodno razvijeni algoritam sa integrisanim Canny detektorom ivica, pri čemu je prag određen iterativno. Kvalitet termovizijske slike je značajno bolji, u poređenju sa slikama snimljenim u okviru inicijalnih eksperimenata. Kolosek je detektovan na rastojanju do oko 250 m (Slika 3.18 (b)), mereno od termovizijske kamere. Na slici 3.18 (c), zelenom bojom je prikazan detektovani kolosek na termovizijskoj slici, pa se može zaključiti da su rezultati detekcije koloseka zadovoljavajući. Pored toga, na detektovanom koloseku je uočen prekid (obeleženo crvenom bojom na slici 3.18 (b)), što, u realnom scenariju, može odgovarati prisustvu objekata na samom koloseku. U ovom slučaju, članovi SMART projektnog tima su bili na rastojanju od oko 180 m, mereno od termovizijske kamere.

U okviru daljih istraživanja, vršene su detaljne analize mogućih tehničkih rešenja termovizijske kamere. Na osnovu toga, kao optimalno rešenje je izabrana termovizijska kamera FLIR model TAU2 sa rezolucijom od  $640 \times 480$  piksela i objektivom sa fiksnom žižnom daljinom od 100mm (Slika 3.19 (a)) [213]. Male dimenzije kamere i činjenica da senzor ne zahteva hlađenje, zajedno sa mogućnošću da se proširi adapterom za gigabitnu Ethernet komunikaciju, čine ga pogodnim za potrebe prethodno opisanog sistema mašinske vizije. Specifične potrebe ovog sistema zahtevaju korišćenje objektivsa sa velikim žižnim daljinama kako bi se postiglo dovoljno uvećanje za otkrivanje udaljenih prepreka. FLIR objektiv sa žižnom daljinom od 100 mm i otvorom blende (odnos žižne daljine objektivsa i veličine otvora objektivsa)  $f/1.6$ , i dužinom od 100 mm i prečnikom od 82 mm, zadovoljava zadate zahteve [214, 215]. Ovaj model objektivsa je izabran na osnovu ekspertskog znanja stručnjaka iz kompanije HD Sova, i prethodno prikazanog testiranja na terenu.



(a)



(b)

**Slika 3.19** Termovizijska kamera FLIR model TAU2: sa objektivom (a) [214],  
bez objektivsa (b) [213]

Izabrana termovizijska kamera (Slika 3.19 (b)) poseduje nehladeni vanadijum-oksidni (VOx) mikrobolometarski senzor sa veličinom piksela od 17  $\mu\text{m}$  koji, u sklopu sa objektivom žižne daljine od 100 mm, ima vidno polje (engl. *field of view (FOV)*) od  $6.2^\circ \times 5^\circ$  i unutrašnje vidno polje od 0.17 mrad. Ekvivalentno, na rastojanju od 1000 m, svaki piksel „pokriva” kvadrat dimenzija 17 $\times$ 17 cm. Puna učestalost frejmova je 25 Hz, a za eksportovanje slika, broj slika u sekundi (engl. *frames per second (fps)*) je 8.3 Hz. Spektralni opseg kamere je 7.5-13.5  $\mu\text{m}$ , dok je osetljivost  $<0.05^\circ\text{C}$  sa otvorom blende f/1.0. Temperaturni opseg u sceni je, sa visokim pojačanjem, od  $-25^\circ\text{C}$  do  $+135^\circ\text{C}$ , a sa niskim pojačanjem, od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+550^\circ\text{C}$ . Radni temperaturni uslovi kamere su od  $-40^\circ\text{C}$  do  $+80^\circ\text{C}$ , u opsegu vlažnosti sredine od 5 % do 95 % bez kondenzacije. Ukupna masa kamere i objektiva je 479 grama. S obzirom na navedene karakteristike, ova kamera odgovara zahtevima i omogućava testiranje sistema u različitim vremenskim uslovima, nezavisno od uslova osvetljenja [214].

Međutim, da bi se koristili podaci sa TAU 2 kamere, potrebno je pretvoriti ih iz jednog od dostupnih izlaznih formata u GigE format. To je postignuto pomoću Workswell GigE adaptera (Slika 3.20) koji se povezuje na 50-opinski Hirose konektor sa zadnje strane TAU 2 kamere (Slika 3.21) [216].



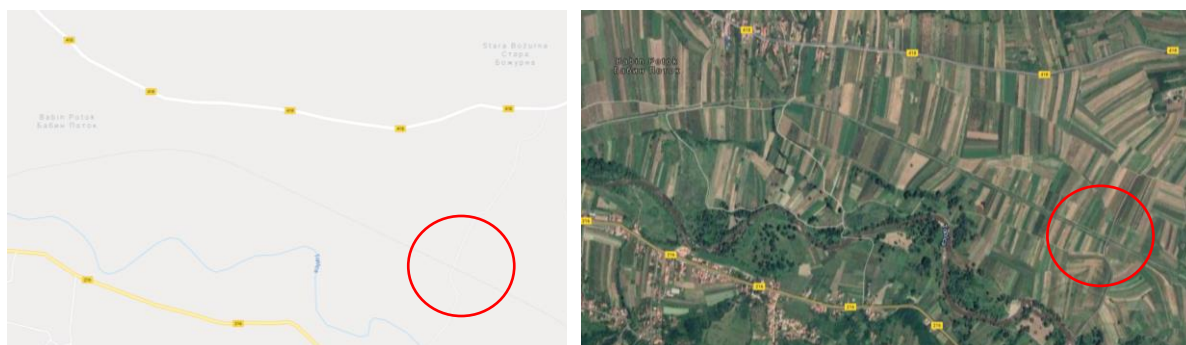
Slika 3.20 Workswell GigE adapter [216]



Slika 3.21 Termovizijska kamera i Workswell GigE adapter (a), povezivanje termovizijske kamere i adaptera (b) [216]

Adapter se nalazi u aluminijumskom kućištu i pričvršćen je na kameru pomoću 4 zavrtnja, tako da čine jedan čvrst i robustan sklop (Slika 3.21 (b)). Ovaj adapter takođe omogućava da Power over Ethernet (PoE) obezbedi napajanje i za kameru i za sam adapter tako da nema potrebe za zasebnim kablovima za napajanje. Jedini nedostatak je što ne dopušta hardversko pokretanje (trigerovanje) zbog čega će se za tu namenu koristiti softversko rešenje. Masa adaptera je 130 g, a dimenzije 46×48×54 mm. Radni temperaturni uslovi su od -40°C do +60°C bez kondenzacije, pri čemu poseduje IP40 zaštitu, što zadovoljava zahteve za testiranjem sistema u različitim vremenskim uslovima. Odabrani Gigabitni Ethernet adapter omogućava brzu komunikaciju između senzora i računara/ugrađenog sistema.

Termovizijska kamera FLIR model TAU2 je korišćena u procesu određivanja regiona od interesa, odnosno za detekciju koloseka u noćnim uslovima. Za tu namenu, eksperimenti su vršeni u toku 2017., 2018. i 2019. godine, a kao deo aktivnosti u okviru projekta SMART, i to na lokaciji u blizini sela Babin Potok, udaljenoj 7,2 km od grada Prokuplja.



**Slika 3.22** Lokacija putnog prelaza u blizini sela Babin Potok

Izabrana lokacija je putni prelaz, koji se nalazi u ruralnoj sredini, u blizini sela Babin Potok, i to u nenaseljenom delu, tako da u široj okolini ne postoji nijedan objekat, niti izvor osvetljenja (obeleženo crvenim krugom na slici 3.22). Navedeni putni prelaz (u daljem tekstu: lokacija Babin Potok) se nalazi na ukrštanju lokalnog neasfaltiranog puta i magistralne pruge Niš-Prokuplje-Merdare, a eksperimenti su vršeni na delu železničke pruge Niš-Prokuplje, između železničkih stanica Rečica i Babin Potok, u smeru ka Prokuplju. Na tom delu, železnička pruga je jednokolosečna i nije elektrificirana. Putni prelaz je obeležen znacima vertikalne drumske signalizacije, nije osvetljen, a nije ni opremljen odgovarajućom opremom (Slika 3.23).



*Slika 3.23 Putni prelaz u blizini sela Babin Potok u dnevnim uslovima*

U dnevnim uslovima, pri pretežno oblačnom vremenu i temperaturi od  $3^{\circ}\text{C}$ , na prelazu je izmerena količina osvetljenja od 15580 luksa. U istim vremenskim uslovima, duž koloseka, gde sa jedne strane postoji rastinje visine oko 2-3 m (Slika 3.24 (a)), izmerena je količina osvetljenja od 12780 luksa. Međutim, u noćnim uslovima, pri temperaturi od  $2^{\circ}\text{C}$ , na putnom prelazu i duž koloseka, izmerena je količina osvetljenja od 0 luksa. To je sasvim razumljivo, s obzirom da na prelazu niti u njegovoj blizini, ne postoji nijedan izvor svetlosti (Slika 3.24 (b)). Zbog navedenih uslova osvetljenja u noćnim uslovima, ali i sa bezbednosnog aspekta realizacije eksperimenata, izabrana je opisana lokacija.



*Slika 3.24 Okolina koloseka (a), Okolina putnog prelaza i lokalni put (b)*

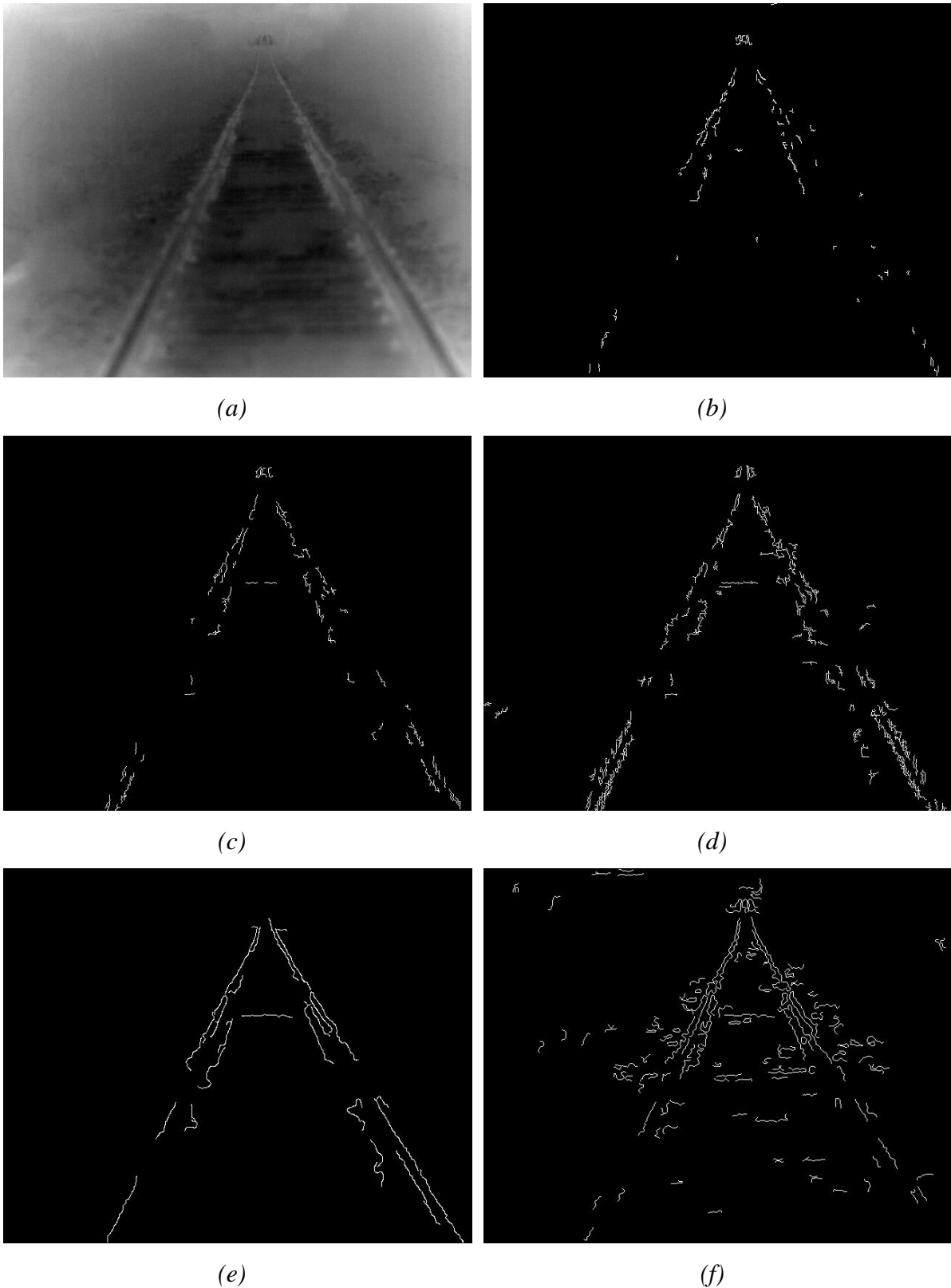
Kako bi se izvršilo određivanje regiona od interesa na termovizijskoj slici, vršena je detekcija i lokalizacija koloseka u realnim scenarijima. Set termovizijskih slika je snimljen novembra 2017. godine, u noćnim uslovima na lokaciji Babin Potok, pri vedrom vremenu, temperaturi od  $3,5^{\circ}\text{C}$  i relativnoj vlažnosti vazduha od 85,4 %. Takođe, postavljanje opreme je vršeno u noćnim uslovima, pri čemu su korišćeni izvori osvetljenja koji odgovaraju uređaju za osvetljavanje kod železničkih vozila (farovi), kako bi uslovi eksperimenta odgovarali realnom scenariju (Slika 3.25). Izvori osvetljenja su bili postavljeni na putnom prelazu i usmereni prema koloseku. Kamere su montirane na putnom prelazu na visini od 1,5 m. Ova visina odgovara visini mesta na lokomotivi Srbija Kargo ŽS serije 444 na kome je, u toku realizacije projekta SMART, planirano da se sistem mašinske vizije postavi.





*Slika 3.25 Postavljanje opreme na lokaciji Babin Potok*

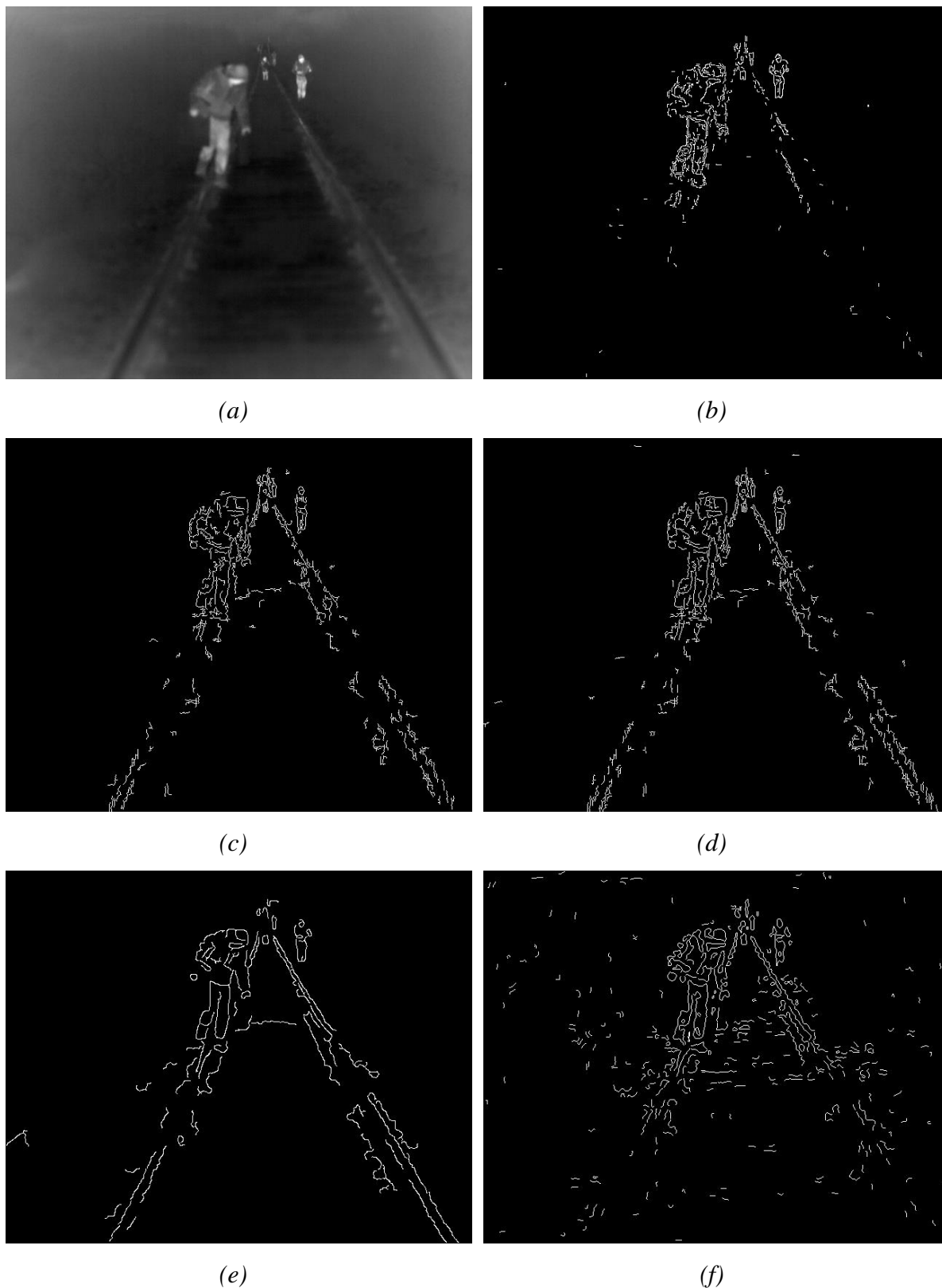
Za detekciju koloseka je korišćen razvijeni algoritam zasnovan na detekciji ivica, a prag je određen iterativno. Jedan od testiranih realnih scenarija, gde su u sceni pruga i okolina, je prikazan na slici 3.26 (a). Kolosek bi trebao da se detektuje sa što većim kvalitetom i što nižim šumom ili potpuno bez šuma. Kako bi se izabrao optimalan, testirano je pet različitih metoda detekcije ivica - Roberts, Sobel, Prewitt, Canny i LoG, sa vrednostima pragova 0,02, 0,02, 0,015, 0,46 i 0,0008, redom, u opsegu od 0 do 1, pri čemu je vršeno uklanjanje ivica sačinjenih od malog broja piksela. U svim eksperimentima, vršeno je podešavanje visoke vrednosti praga Canny detektora, a niska vrednost je određivana na osnovu Otsu metode [217]. Rezultati detekcije koloseka su prikazani na slici 3.26.



*Slika 3.26 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok: termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f)*

Rezultati su pokazali da je Roberts detektor ivica detektovao kolosek, ali sa velikim prekidima. Sobel detektor ivica je dao nešto bolje rezultate sa manjim prekidima, dok je Prewitt detektor bolje detektovao kolosek, ali sa šumom. LoG detektor je dao rezultate sa visokim šumom, a čak nije ni detektovao kolosek u jednom delu scene. Iako Canny detektor ivica u manjoj meri nije detektovao kolosek, zbog sličnih vrednosti nivoa intenziteta koloseka i okoline, šum nije prisutan. Dakle, na osnovu poređenja pet detektora ivica, Canny detektor ivica, u ovakvom scenariju, predstavlja optimalno rešenje, zbog ispravne detekcije koloseka, pa se može koristiti u postupku određivanja regiona od interesa.

Međutim, prisustvo objekata u sceni je svakako moguće u realnom scenariju. Prema tome, kompleksniji scenario obuhvata tri vrste objekata u sceni, kolosek, okolinu i objekte, koji u nekim delovima mogu imati slične ili čak i iste vrednosti nivoa intenziteta. Upravo zbog toga su, u istim vremenskim uslovima i uslovima osvetljenja, izvršeni eksperimenti sa objektima na koloseku. Članovi SMART projektnog tima su imitirali objekte na koloseku i zauzeli su pozicije tako da se nalaze na određenim rastojanjima od termovizijske kamere, u rasponu od 50-500m, i to tako da budu na koloseku, pored koloseka i između šina (Slika 3.27 (a)). S obzirom da je glavni cilj bio detektovati kolosek sa što većim kvalitetom i nižim šumom ili potpuno bez šuma, prisustvo objekata u sceni je dodatno usložilo postupak detekcije. Za detekciju koloseka, korišćen je razvijeni algoritam zasnovan na detekciji ivica, a prag je određen iterativno. U cilju odabira optimalnog detektora ivica, testirano je pet različitih metoda detekcije ivica - Roberts, Sobel, Prewitt, Canny i LoG, sa vrednostima pragova 0,015, 0,01, 0,01, 0,065 i 0,0006, redom, u opsegu od 0 do 1, i vršeno je uklanjanje ivica malih dužina (Slika 3.27 (b), (c), (d), (e), (f)) [146, 149].

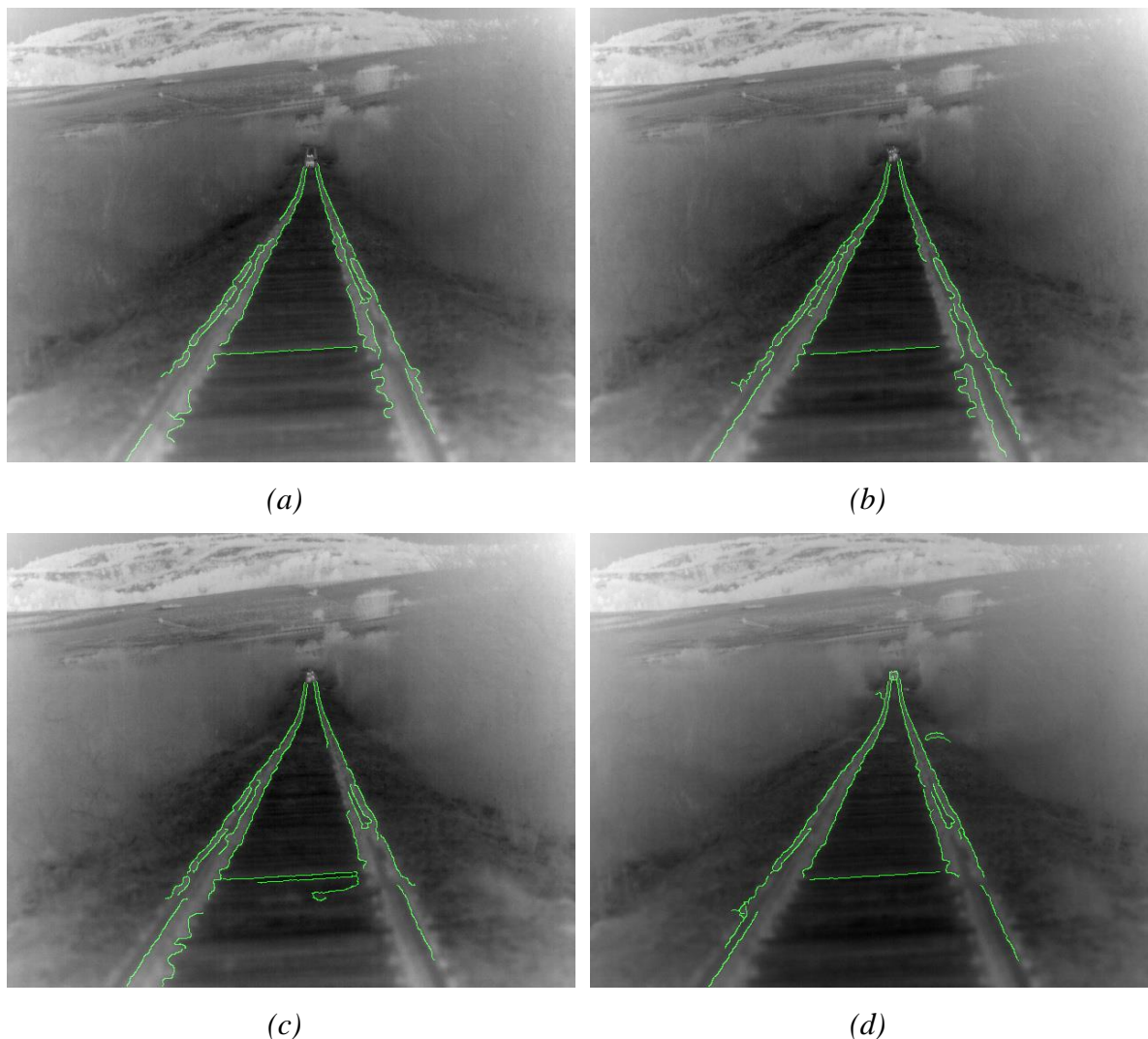


*Slika 3.27* Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario sa objektima (a) termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f) [146]

Na osnovu prikazanih rezultata, može se primetiti da LoG detektor ivica nije pokazao zadovoljavajuće rezultate, jer postoji mnogo detektovanih ivica u okolini, ali kolosek, kao jedan od glavnih ciljeva, nije detektovan na odgovarajućem nivou (Slika 3.27 (f)). Prewitt detektor ivica je pokazao bolje rezultate od LoG-a, ali postoje i značajni diskontinuiteti na ivicama koloseka, što može predstavljati problem za ispravno određivanje regiona od interesa (Slika 3.27 (d)). Sa druge strane, Roberts detektor ivica je pokazao izuzetno loše rezultate, jer kolosek uopšte nije detektovan (Slika 3.27 (b)). Detektor ivica na bazi Sobelovog operatora je pokazao bolje rezultate od svih prethodnih detektora, ali nisu zadovoljavajući jer postoje određeni prekidi u detektovanom koloseku (Slika 3.27 (c)). Međutim, Canny detektor ivica je, u odnosu na ostale, pokazao najbolje rezultate pa se, iako ima manjih prekida u koloseku, može odrediti region od interesa (Slika 3.27 (e)) [146]. Takođe, prekid koloseka postoji i na mestima gde su objekti na koloseku, što odgovara realnom scenariju, a može se primetiti da je Canny detektor ivica pokazao dobre rezultate i u detekciji ivica objekata, iako to nije bio glavni cilj.

S obzirom na potrebnu detekciju potencijalnih prepreka na rastojanju do 1000m, bilo je potrebno odrediti region od interesa i na tim rastojanjima. Za tu namenu, vršeni su eksperimenti marta 2019. godine, u noćnim uslovima, na lokaciji Babin Potok, pri vedrom vremenu i temperaturi od 18°C. Ovi vremenski uslovi su izabrani, jer je bilo potrebno izvršiti detekciju pri niskim temperaturama, što je već urađeno u prethodnim eksperimentima, ali i pri visokim temperaturama. U okviru niza eksperimenata, u realnom scenariju, članovi projektnog tima su imitirali objekte i zauzimali pozicije na različitim rastojanjima, u rasponu od 400 do 950 m, mereno od termovizijske kamere. Kao i u prethodnim eksperimentima, termovizijska kamera je bila postavljena na putnom prelazu na visini od 1,5 m, a korišćeni su i odgovarajući izvori osvetljenja, takođe postavljeni na putnom prelazu. S obzirom na relativno velika rastojanja od objekta, izvori osvetljenja nisu imali apsolutno nikakav uticaj na povećanje vidljivosti samih objekata.

Za detekciju koloseka je korišćen razvijeni algoritam zasnovan na Canny detektoru, a prag je određen iterativno (vrednost praga je u opsegu 0,2-0,3), sa glavnim ciljem detektovanja koloseka sa što većim kvalitetom i nižim šumom ili potpuno bez šuma. Rezultati detekcije koloseka, kada su članovi tima na rastojanjima od 625 m, 750 m, 850 m i 935 m, su prikazani na slici 3.28, gde je zelenom bojom označen detektovan kolosek.



**Slika 3.28** Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario sa objektima velikim  
rastojanjima: 625 m (a), 750 m (b), 850 m (c), 935 m (d)

Analizom dobijenih rezultata, uočeno je da razvijeni algoritam za detekciju koloseka vrši ispravnu detekciju koloseka, odnosno rezultati detekcije su visokog kvaliteta i bez šuma, čak i u drugačijim vremenskim uslovima. Prisustvo objekata na koloseku na velikim rastojanjima od termovizijske kamere, nije značajno uticalo na kvalitet detekcije, pri čemu je u nekim slučajevima, algoritam detektovao i deo objekata na koloseku. Pored toga, uočeno je da je detektovani kolosek potpuno u prekidu u delu gde se nalaze objekti, a to svakako može doprineti postupku detekcije potencijalnih prepreka u regionu od interesa. Iako postoje manji prekidi u detektovanom koloseku, to svakako ne utiče na pravilno određivanje regiona od interesa.

Međutim, vidljivost, između ostalog, zavisi i od vremenskih uslova. Tako, u noćnim uslovima, gde je vidljivost bez dovoljne jačine veštačkog osvetljenja ionako značajno

smanjena, dodatni uticaj na njeno smanjenje mogu imati visoka relativna vlažnost vazduha, prisustvo padavina i magle, itd. Kako bi se proverila robustnost razvijenog algoritma i kvalitet detekcije koloseka u realnim scenarijima, a pri lošim vremenskim uslovima, vršeni su eksperimenti novembra 2018. godine. Izabrana je lokacija Babin Potok, pri temperaturi od 1°C, a na i u okolini koloseka bio je prisutan i snežni pokrivač (Slika 3.29 (a, b)). S obzirom da je još u toku dana počelo formiranje magle na lokaciji, a u sumrak se inteziviralo (Slika 3.29 (c, d)), bilo je izvesno da će se u noćnim uslovima povećati relativna vlažnost vazduha ali i prisustvo magle, što je i prikazano na slici 3.29 (e), koja je snimljena uz pomoć dodatnog izvora svetlosti. tj. „blica”.



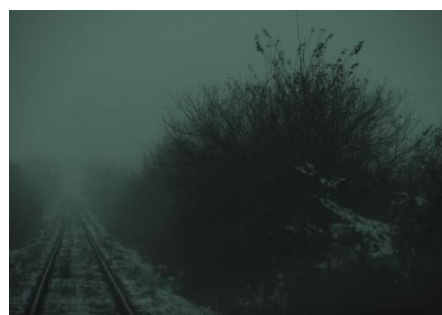
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Slika 3.29** Lokacija Babin Potok: snežni pokrivač na (a) i u okolini koloseka (b), formiranje magle u toku dana (c) i u sumrak (d), magla i snežni pokrivač na i u okolini koloseka u noćnim uslovima (e)

To je sve uticalo na značajno smanjenje vidljivosti na terenu, što je zapravo odgovaralo željenim uslovima eksperimenta, kako bi se detekcija koloseka vršila u realnim scenarijima. Ipak, iako su korišćeni izvori osvetljenja, koji odgovaraju uređaju za osvetljavanje kod železničkih vozila, vidljivost na koloseku je bila izuzetno smanjena, što se može videti na slici 3.30, gde je poređenja radi, prikazana vidljivost putnog prelaza na lokaciji, sa uključenim uređajima za osvetljavanje, sa rastojanja od 50 m (Slika 3.30 (a)) i 150 m (Slika 3.30 (b)). Termovizijska kamera je bila postavljena na putnom prelazu na odgovarajućoj visini, kao i u prethodnim eksperimentima, međutim na drugačijoj poziciji u odnosu na kolosek.



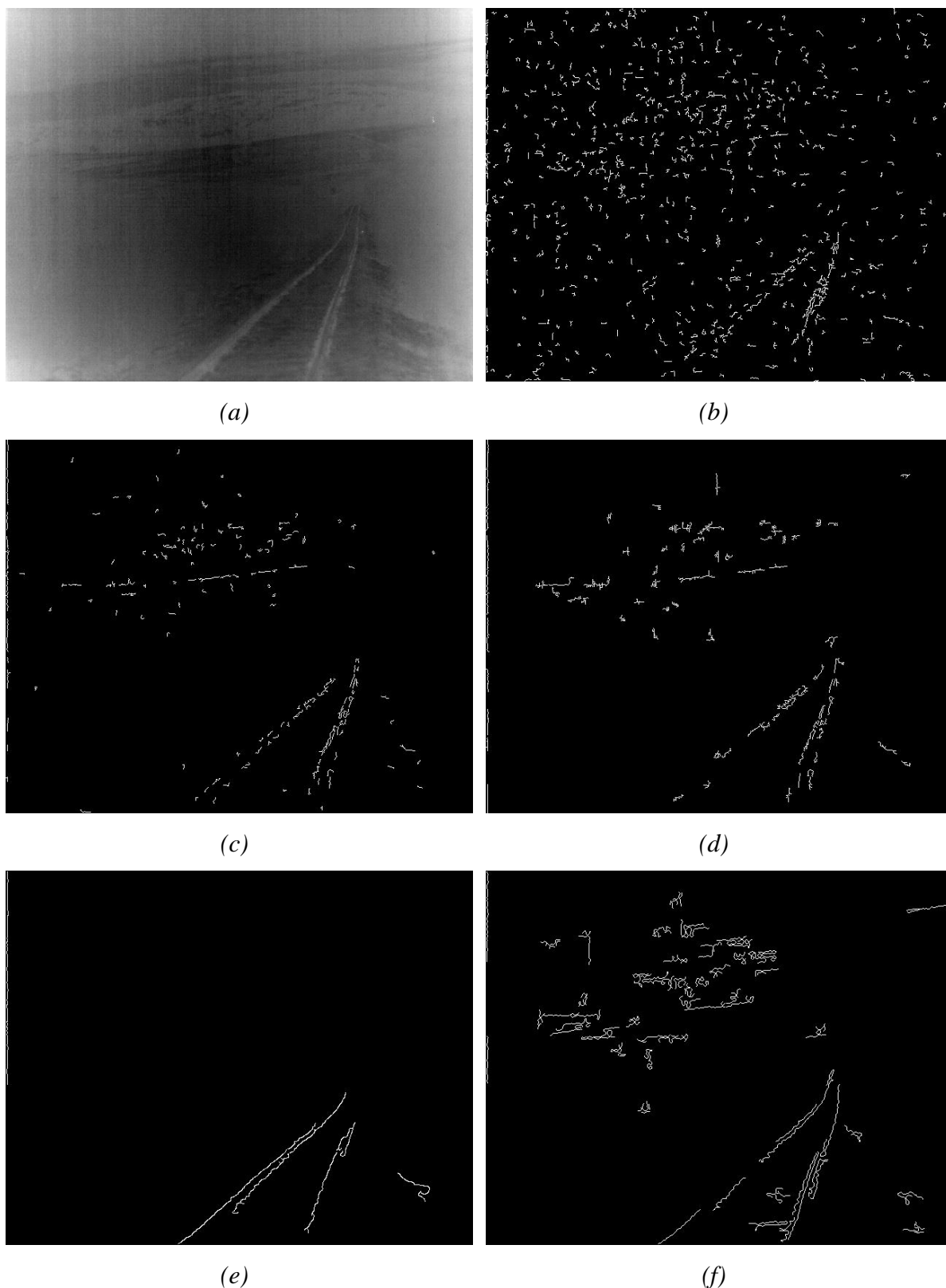
(a)

(b)

*Slika 3.30 Lokacija Babin Potok; vidljivost putnog prelaza, sa uključenim uređajima za osvetljavanje, sa rastojanja od 50m (a) i 150m (b)*

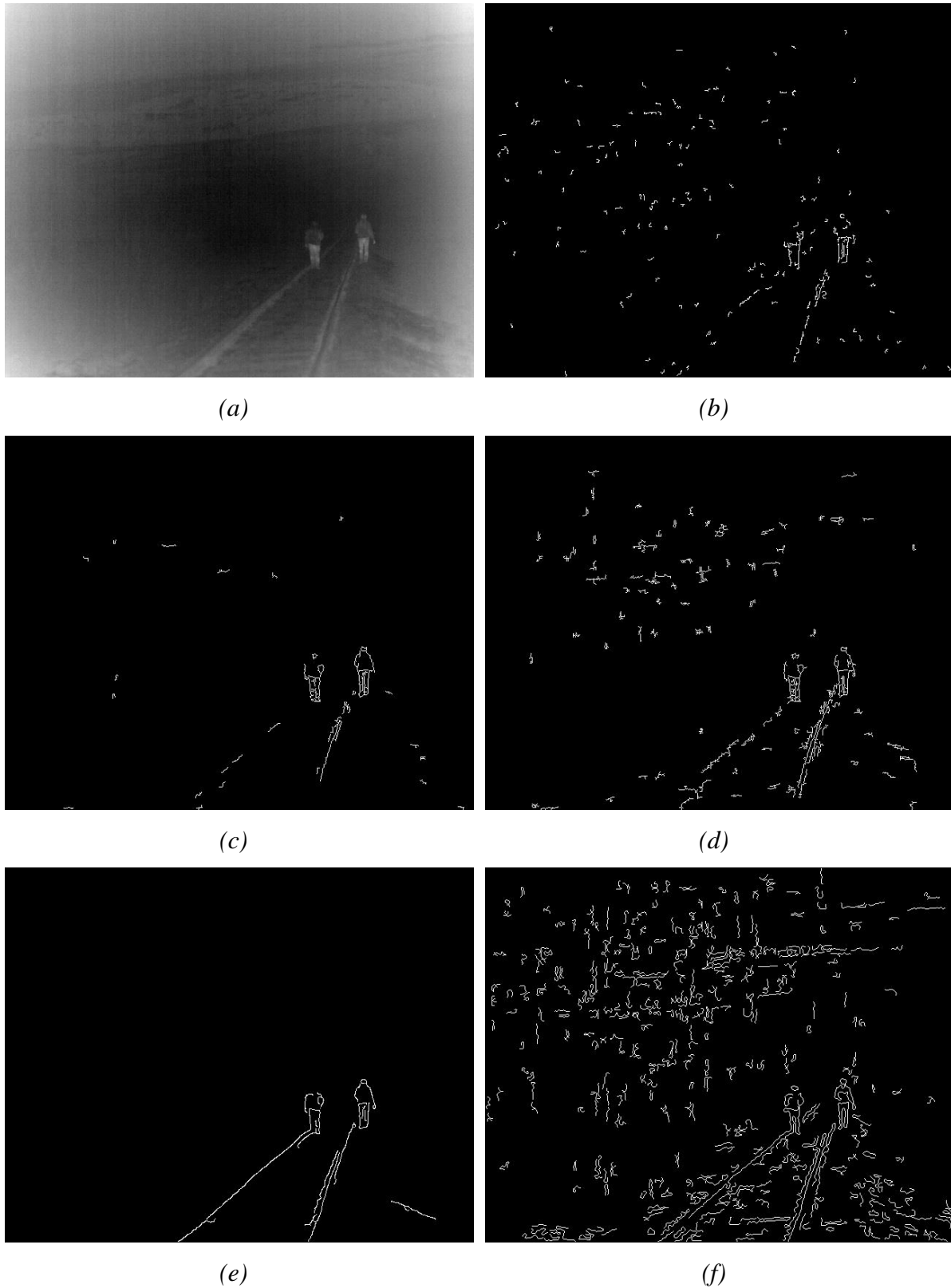
U prethodno opisanim uslovima, u cilju provere robustnosti algoritma, vršena je detekcija koloseka na setu termovizijskih slika, i to u dva slučaja: kada na koloseku nisu bili prisutni objekti i kada na koloseku jesu bili prisutni objekti. U prvom slučaju (Slika 3.31), vršena je detekcija koloseka primenom pet detektora ivica: Roberts, Sobel, Prewitt, LoG i Canny, kako bi se utvrdilo optimalno rešenje za ovakav tip realnog scenarija. Pragovi su određeni iterativno, i to sa sledećim vrednostima: 0,02, 0,025, 0,02, 0,7, 0,001, redom. Rezultati su pokazali da Roberts detektor (Slika 3.31 (b)) nije moguće koristiti za ovu namenu, pre svega zbog prisustva visokog šuma, ali i niskog kvaliteta detekcije koloseka. Iako su detektori Sobel (Slika 3.31 (c)) i Prewitt (Slika 3.31 (d)), pokazali nešto bolje rezultate, zbog postojanja šuma i određenih prekida u detektovanom koloseku, upitno je određivanje regiona od interesa. Detektor LoG (Slika 3.31 (f)) je dobro detektovao kolosek, ali takođe postoji značajan šum. Sa druge strane, Canny detektor je i u ovom tipu scenarija pokazao najbolje rezultate detekcije sa malim prekidima u detektovanom koloseku, ali i izuzetno niskim šumom (Slika 3.31 (e)).





*Slika 3.31* Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario u lošim vremenskim uslovima: termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f)

U drugom slučaju, članovi projektnog tima SMART su imitirali objekte na koloseku, što je potencijalno moglo da utiče na kvalitet detekcije koloseka. Međutim, u toku eksperimenta, došlo je do povećanja relativne vlažnosti vazduha i inteziviranja magle. Kao posledica toga, došlo je do pojave kondenzata na površini koloseka, što je uticalo na njegovu emisivnost, a time i na kvalitet snimljenih termovizijskih slika. Ipak, kako to jeste doprinelo smanjenju vidljivosti, a predstavlja jedan od mogućih realnih scenarija, i u ovom slučaju, kao i u prethodnim eksperimentima, u cilju odabira optimalnog rešenja, vršena je detekcija koloseka primenom pet detektora ivica, sa iterativnim određivanjem praga, sa vrednostima: 0,02, 0,02, 0,015, 0,36, 0,0008, redom. Na slici 3.32 (a), prikazan je jedan od snimljenih scenarija, gde se objekti nalaze na rastojanju od 150 m od termovizijske kamere. S obzirom da je primarni cilj bio detekcija koloseka, Roberts detektor (Slika 3.32 (b)) nije pokazao zadovoljavajuće rezultate zbog loše detekcije koloseka i prisustva šuma. Sobel detektor (Slika 3.32 (c)) je pokazao rezultate sa niskim šumom, ali sa lošom detekcijom koloseka i dobrom detekcijom objekata. Sa druge strane, Prewitt i LoG detektori su pokazali detekciju koloseka i objekata, i to sa visokim kvalitetom, ali sa veoma velikim šumom (Slika 3.32 (d) i (f)). Canny detektor ivica je pokazao veoma dobre rezultate detekcije koloseka i objekata, ali je i prisutan veoma nizak šum. S obzirom da je glavni cilj bio detekcija koloseka sa visokim kvalitetom (a ne detekcija objekata) i niskim šumom ili potpuno bez njega, može se zaključiti da je Canny detektor ivica pokazao najbolje rezultate za ovakav tip scenarija. Takođe, i ovde se može primetiti da postoje prekidi u detektovanom koloseku na mestima gde u realnom scenariju postoje objekti, što može doprineti njihovoj detekciji. Analizom rezultata detekcije u više scenarija, zaključeno je da je Canny detektor ivica pokazao najbolje rezultate detekcije koloseka, pa je, shodno tome, integrisan u algoritam za određivanje regiona od interesa.



*Slika 3.32 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario u lošim vremenskim uslovima i prisustvom objekata na koloseku: termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f)*

Međutim, u okviru istraživanja na projektu SMART, vršeni su eksperimenti u martu 2018. godine na potpuno drugoj lokaciji, a kako bi se proverila robustnost razvijenog algoritma za određivanje regiona od interesa na termovizijskoj slici snimljenoj termovizijskom kamerom FLIR model TAU2. Cilj ovih eksperimenata je bio da se, u potpuno drugačijem okruženju, a u noćnim uslovima, proveri rad razvijenog algoritma, zasnovanog na Canny detektoru ivica. Eksperimenti su obuhvatali detekcije koloseka u realnim scenarijima – bez objekata i sa objektima na koloseku. Izabrana lokacija za vršenje eksperimenata je putni prelaz, koji se nalazi nadomak sela Žitorađa (u daljem tekstu lokacija Žitorađa). Putni prelaz se nalazi u ruralnoj sredini, i to u nenaseljenom delu, tako da u široj okolini ne postoji nijedan objekat, niti izvor osvetljenja (obeleženo crvenim krugom na slici 3.33). Međutim, blizu putnog prelaza se nalazi lokalna saobraćajnica između sela Jasenica i Žitorađa, pa se, povremeno i delimično, može javiti indirektno osvetljenje nastalo od farova drumskih vozila.



**Slika 3.33** Lokacija putnog prelaza u blizini sela Žitorađa

Putni prelaz se nalazi na ukrštanju lokalnog neasfalitiranog puta i magistralne pruge Niš-Prokuplje-Merdare. Eksperimenti su vršeni na delu železničke pruge Niš-Prokuplje, između železničkih stanica Jasenica i Žitorađa-Centar, u smeru ka Prokuplju. Na tom delu, železnička pruga je jednokolosečna i nije elektrificirana. Putni prelaz nije obeležen znacima vertikalne drumske signalizacije, nije osvetljen, a nije ni opremljen odgovarajućom opremom ili uređajima za obezbeđenje saobraćaja (Slika 3.34).



(a)

(b)

**Slika 3.34** Putni prelaz na lokaciji Žitorada u dnevnim uslovima: prilazni put (a),  
putni prelaz (b)

Na lokaciji Žitorada, u dnevnim uslovima, pri pretežno sunčanom vremenu i temperaturi od 4°C, izmerena je količina osvetljenja od 27180 luksa na putnom prelazu, dok se duž koloseka razlikovala za  $\pm 1$  %, u proseku. U noćnim uslovima, pri temperaturi od 2°C, na celoj lokaciji, odnosno na putnom prelazu i duž koloseka, izmerena je količina osvetljenja od 0 luksa. Ipak, bez obzira na blizinu saobraćajnice, merenjima na terenu je utvrđeno da svetlost, koja potiče od drumskih vozila, ne može značajno uticati na povećanje količine svetlosti i vidljivosti na samom koloseku. Specifičnost ove lokacije je da se putni prelaz nalazi u nenaseljenom i neosvetljenom delu, ali i da se na rastojanju od 820m od putnog prelaza, u smeru ka Prokuplju, nalaze stambeni objekti. Ovakvo mešovito okruženje svakako jeste realni scenario i može uticati na rad sistema mašinske vizije. Upravo zbog toga, ova lokacija je izabrana, uzimajući u obzir takve specifične okolnosti, kao i bezbednosne aspekte realizacije eksperimenata.

U okviru eksperimenata koji su realizovani u noćnim uslovima, pri vedrom vremenu i temperaturi od 8°C, sistem prikazan na slici 3.35 (a), postavljen je na putnom prelazu na odgovarajućoj visini, kao i u prethodnim eksperimentima. Ovaj sistem, kao i u prethodnim eksperimentima, između ostalog, sadrži i termovizijsku kameru (označeno crvenim krugom na slici 3.35 (a)), i izvore osvetljenja, koji su postavljeni tako da imitiraju prisustvo uređaja za osvetljavanje kod železničkih vozila (Slika 3.35 (b)).



(a)

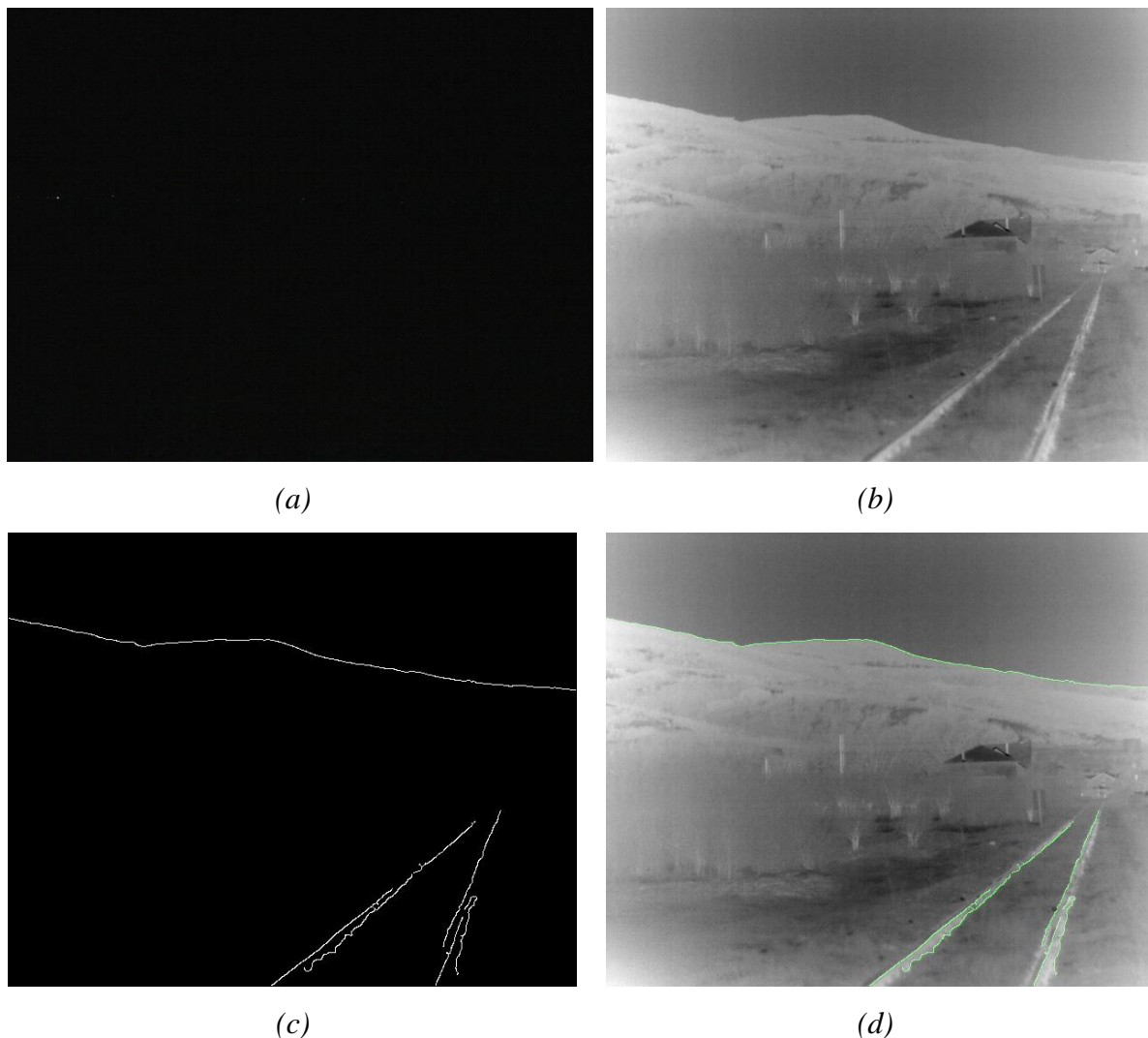


(b)

**Slika 3.35** Postavljanje sistema na lokaciji Žitorada – termovizijska kamera: dnevni uslovi (a), noćni uslovi (b)

Da bi se proverila robustnost razvijenog algoritma za detekciju koloseka na termovizijskoj slici, eksperimentima su obuhvaćena tri realna scenarija. Prvi scenario jeste kada na koloseku nema objekata, a drugi scenario je kada na koloseku i u njegovoj blizini postoje više objekata/ljudi na određenim rastojanjima od termovizijske kamere. Treći scenario je obuhvatao prisustvo jednog objekta na određenoj udaljenosti od sistema, odnosno termovizijske kamere. Takođe, u odnosu na većinu prethodnih eksperimenata, termovizijska kamera je bila postavljena sa strane koloseka.

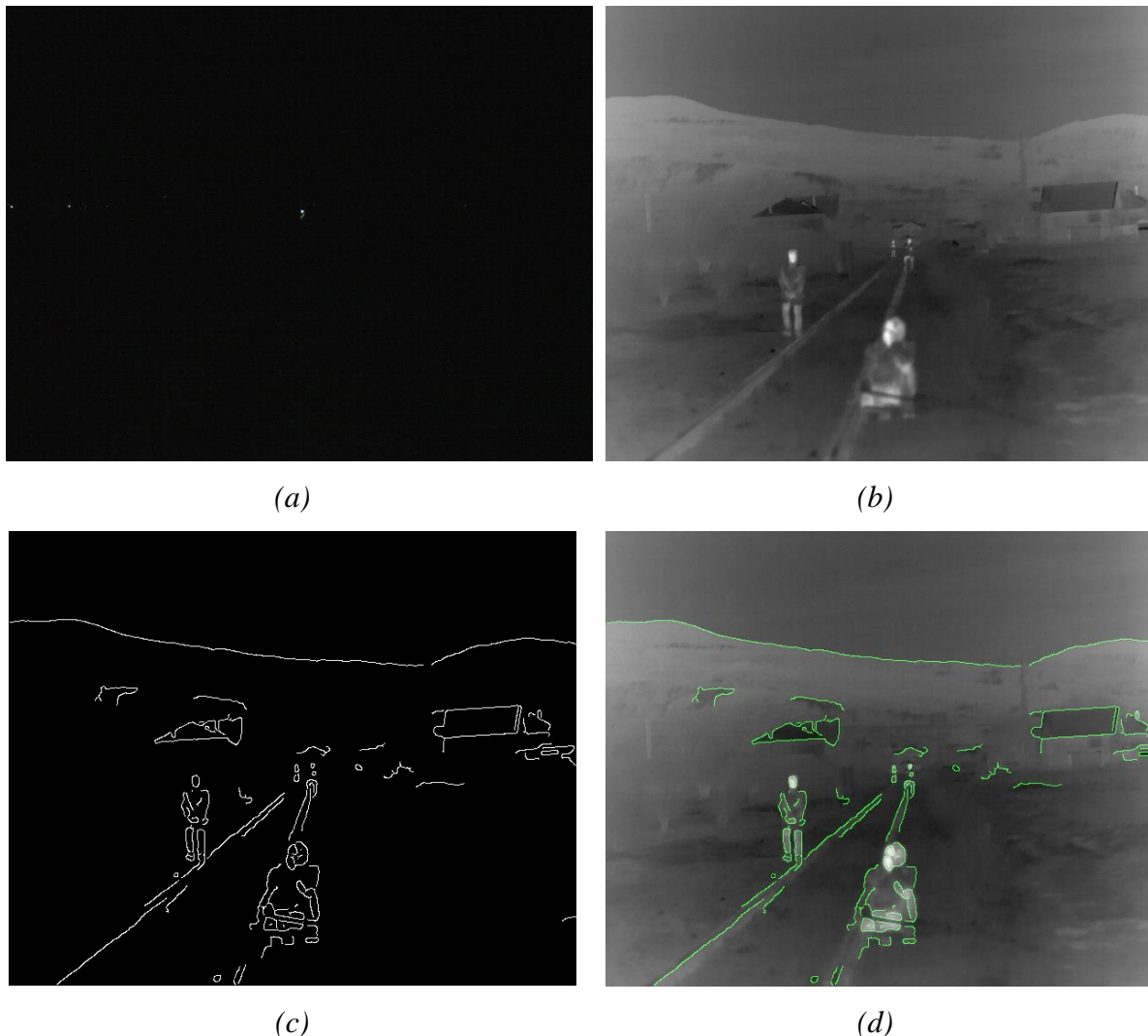
U prvom scenariju, vršena je detekcija koloseka bez objekata. Na slici 3.36 se može videti scena na digitalnoj (a) i termovizijskoj slici (b). Može se primetiti da digitalnu sliku apsolutno nije moguće upotrebiti, ali i da se na termovizijskoj slici uočavaju građevinski objekti. Nakon primene algoritma, dobijeni su rezultati prikazani na slici 3.36 (c), pri čemu je za detekciju ivica korišćen Canny detektor sa iterativno podešenim pragom, sa vrednošću 0,35. Detektovane ivice su prikazane zelenom bojom na slici 3.36 (d). Rezultati detekcije su zadovoljavajući, kolosek je detektovan sa visokim kvalitetom, pri čemu se pojavio šum koji je zapravo ivica, a kao posledica velike razlike u vrednostima nivoa intenziteta brda i neba.



**Slika 3.36** Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa-prvi scenario: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c), detektovan kolosek na termovizijskoj slici (d)

U drugom scenariju, članovi projektnog tima SMART su bili raspoređeni na rastojanjima u rasponu od 50-500 m, mereno od termovizijske kamere, tako da su se nalazili na koloseku i pored njega. Kao i u prethodnom scenariju, digitalnu sliku (Slika 3.37 (a)) nije bilo moguće upotrebiti, dok su na termovizijskoj slici objekti bili uočljivi. Razvijeni algoritam sa vrednošću praga od 0,15 je primenjen i na ovakav scenario, i dobijeni su rezultati prikazani na slici 3.37 (c) i (d). Iako se u rezultatima detekcije očekivao relativno visok šum, zbog prisustva građevinskih objekata i ljudi, ali i velikog raspona u vrednostima nivoa intenziteta na celoj slici, pojavio se šum koji odgovara samo građevinskim objektima i „granici” između brda i neba. Međutim, iako su detektovani i ljudi, primarni cilj detekcije koloseka je ostvaren, a rezultati su zadovoljavajući. S obzirom na veoma kompleksnu scenu, dobar je kvalitet detekcije

sa prihvatljivim nivoom šuma, pri čemu treba naglasiti da je kod detektovanog koloseka postojao prekid, tamo gde su objekti bili na koloseku. Ipak, sve ovo nije značajno uticalo na kasnije pravilno određivanje regiona od interesa.

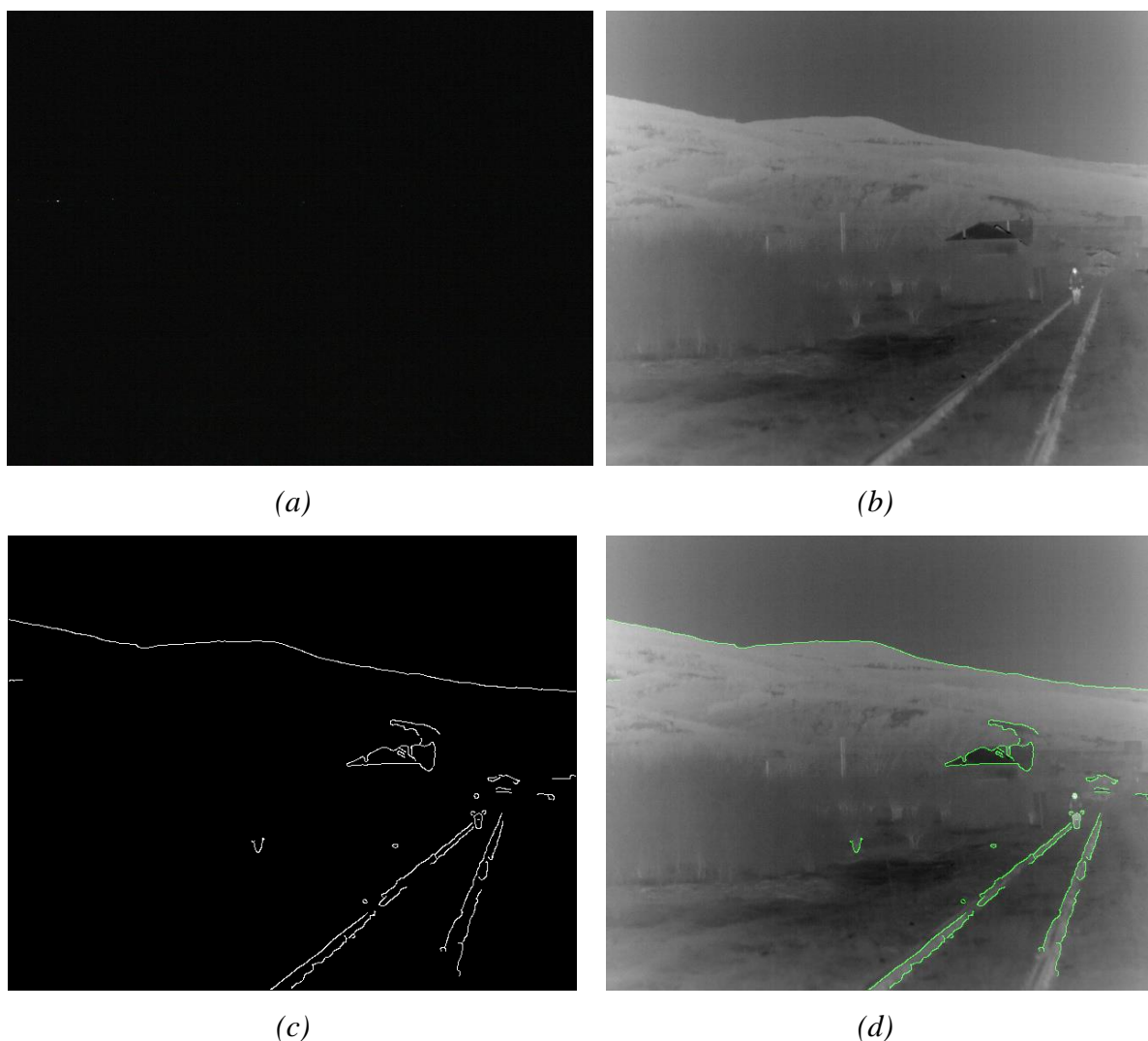


*Slika 3.37 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorada-drugi scenario: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c), detektovan kolosek na termovizijskoj slici (d)*

U trećem scenariju, član projektnog tima SMART je imitirao objekat na koloseku, na rastojanju od oko 400 m od termovizijske kamere. Ni u ovom scenariju, nije bilo moguće koristiti digitalnu sliku (Slika 3.38 (a)), dok se na termovizijskoj slici mogao uočiti objekat. Nakon primene razvijenog algoritma, sa vrednošću praga od 0,26, dobijeni su rezultati prikazani na slici 3.38 (a) i (b). Kolosek je uspešno detektovan sa prekidom u delu gde se nalazi objekat ali je, kao i u prethodnim scenarijima, prisutan relativno nizak šum, koji nije uticao na kasnije pravilno određivanje regiona od interesa. Dakle, na potpunoj drugoj lokaciji, u tri realna



i različita scenarija, razvijeni algoritam, zasnovan na Canny detektoru ivica, pokazao je zadovoljavajuće rezultate u detekciji koloseka na termovizijskim slikama.



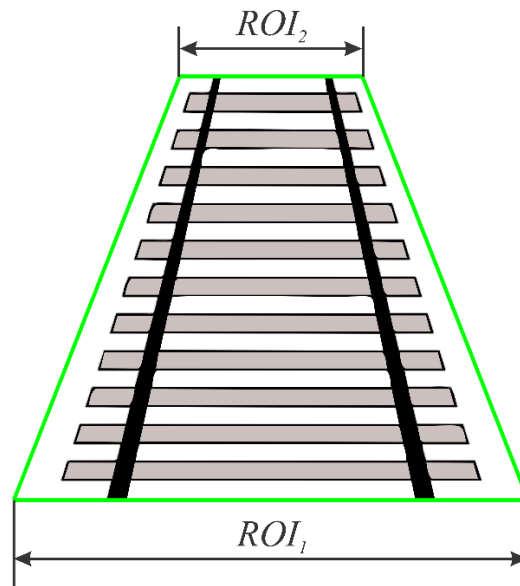
*Slika 3.38 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa-treći scenario: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c), detektovan kolosek na termovizijskoj slici (d)*

Za pravilno određivanje regiona od interesa u noćnim uslovima, ključno je detektovati i lokalizovati kolosek. U okviru ovog dela istraživanja, tokom 2016., 2017., 2018. i 2019. godine, realizovano je više eksperimenata u noćnim uslovima, na četiri različite lokacije. Cilj eksperimenata je bio utvrđivanje mogućnosti primene odgovarajuće metode detekcije ivica, kako bi se izvršila detekcija i lokalizacija koloseka na termovizijskoj slici, ali sa što višim kvalitetom i nižim šumom. Eksperimenti su vršeni u različitim vremenskim i meteorološkim uslovima, i u različitim uslovima osvetljenja. Kao rezultat istraživanja, razvijen je algoritam za detekciju, zasnovan na Canny detektoru ivica. Rezultati su pokazali da je algoritam robustan i

da prikazuje zadovoljavajuće rezultate u svim napred navedenim uslovima, sa dobrim kvalitetom i niskim šumom. Ipak, u ovom delu istraživanja, vršeno je podešavanje parametara Canny detektora tako što je iterativno podešavana visoka vrednost praga, a niska vrednost je određivana na osnovu Otsu metode [217]. Međutim, optimizacijom parametara detektora pomoću metoda veštačke inteligencije, postigao bi se viši kvalitet detekcije, sa još nižim šumom, i na taj način značajno doprinelo pravilnom određivanju regiona od interesa.

### 3.1.2. Detekcija i prepoznavanje objekata primenom termovizijskog sistema

Glavni zadatak predstavljenog sistema mašinske vizije jeste detekcija potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture, i to u noćnim uslovima. S obzirom na potrebe pravovremenog zaustavljanja železničkog vozila, vršena je detekcija objekata na različitim rastojanjima, i to do 1000m. Međutim, kako svaki objekat u sceni ne predstavlja navedenu prepreku, potrebno je odrediti region od interesa i, u tom regionu, vršiti detekciju. Kako bi se odredio region od interesa, vršena je detekcija i lokalizacija koloseka. Na osnovu toga, određivan je region od interesa tako da bude oblika trapeza (označeno zelenom bojom na slici 3.39), gde su  $ROI_1$  i  $ROI_2$  njegove osnovice, izražene u pikselima.



Slika 3.39 Ilustracija koloseka i regiona od interesa

Kao što je već navedeno, region od interesa predstavlja oblast koloseka od  $a=1500$  mm i oblasti sa leve i desne strane koloseka – po  $b=800$  mm. Kako bi se odredio region od interesa na slici, korišćeni su sledeći izrazi:

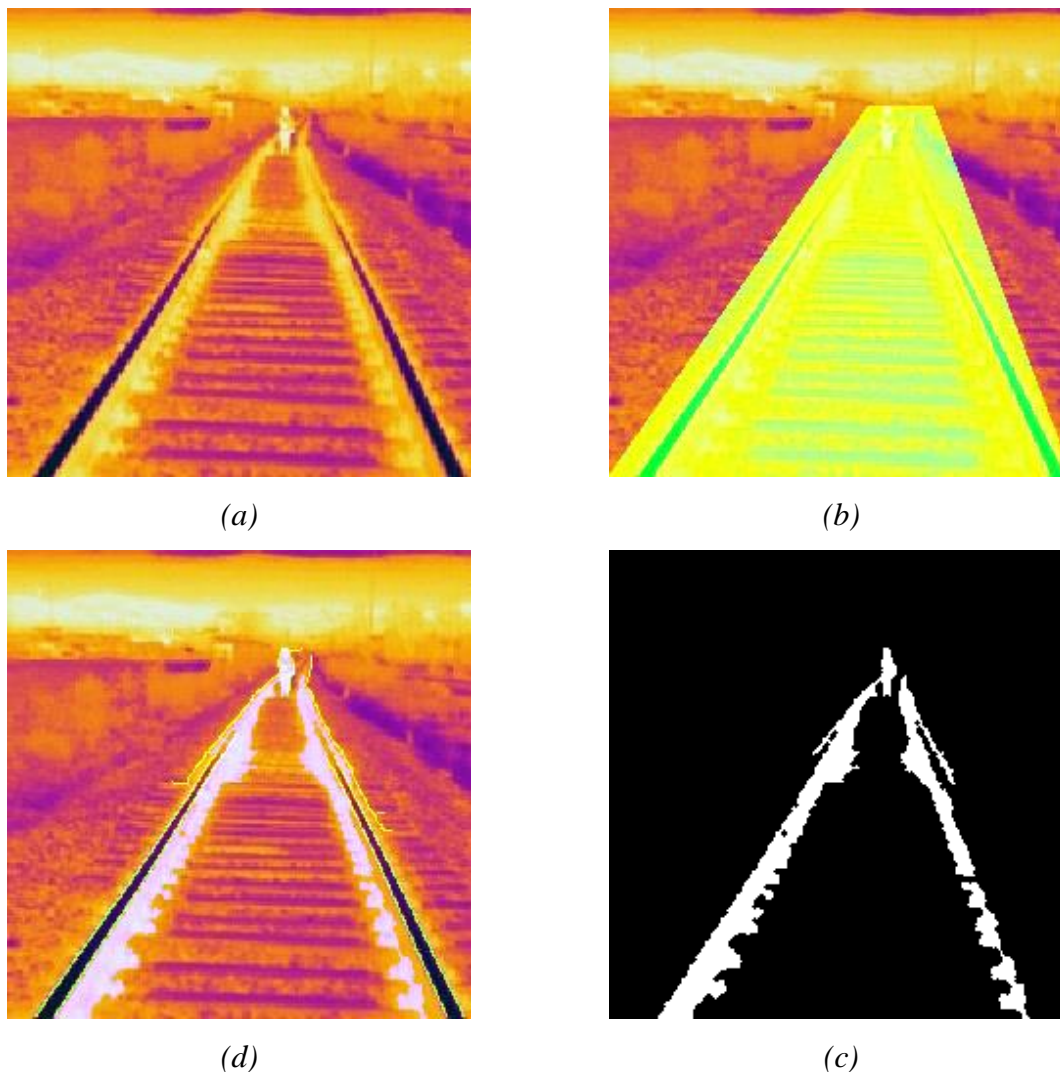
$$ROI_1 = c + 2d, \quad d = \frac{bc}{a} \quad (31)$$

$$ROI_2 = e + 2f, \quad f = \frac{be}{a}, \quad (32)$$

gde su  $c$  i  $e$  odgovarajuća rastojanja između detektovanih šina na slici, u pikselima, a  $d$  i  $f$  predstavljaju odgovarajuće oblasti sa leve i desne strane koloseka na slici, u pikselima, koja se izračunavaju prema navedenim izrazima. Takođe, maksimalna moguća vrednost  $ROI_1$  i  $ROI_2$  je određena dimenzijama slike.

Nakon određivanja regiona od interesa, bilo je potrebno izvršiti detekciju potencijalnih prepreka u tom regionu. Poznato je da je na termovizijskoj slici zastupljena odgovarajuća raspodela temperatura, gde boja ili nijansa sive boje svakog piksela odgovara određenoj vrednosti temperature. U okviru eksperimenata opisanim u prethodnom potpoglavlju, uočeno je da postoji razlika u vrednostima nivoa intenziteta objekata, koloseka i okoline, odnosno da je prisutan određeni kontrast. Međutim, pikseli koji su deo objekata, imaju iste ili slične vrednosti nivoa intenziteta (a značajno se razlikuju od koloseka i okoline), pa se njihovim grupisanjem mogu formirati odgovarajući regioni, koji zapravo predstavljaju objekte. Prema tome, za detekciju objekata, odnosno potencijalnih prepreka, mogu se koristiti metode segmentacije zasnovane na regionu, što je i integrisano u razvijeni algoritam.

U okviru inicijalnih eksperimenata, vršeno je utvrđivanje mogućnosti primene metoda segmentacije zasnovanih na regionu za detekciju objekata, odnosno potencijalnih prepreka. Za te potrebe, razvijen je algoritam i primenjen na setu termovizijskih slika snimljenih termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima, na lokaciji u industrijskoj zoni grada Niša (Slike 3.10 i 3.13) [212]. Jedan od realnih scenarija, kada se objekat-čovjek nalazi između šina koloseka, na rastojanju od 50 metara, mereno od termovizijske kamere, je prikazan na slici 3.40 (a). Nakon detekcije i lokalizacije koloseka, vršena je njegova ekstrakcija, kako bi se odredio region od interesa. Korišćenjem izraza (31) i (32), region od interesa je određen i obeležen zelenom bojom (Slika 3.40 (b)), pri čemu je detektovan kolosek označen žutom bojom. U sledećem koraku, u regionu od interesa, vršena je segmentacija zasnovana na regionu, pri čemu je prag određen iterativno. Na slici 3.40 (c) su prikazani rezultati segmentacije, pa se može videti da su segmentirani i neposredna okolina koloseka i objekat, zbog iste ili slične temperature, a time i vrednosti nivoa intenziteta piksela. Ipak, može se jasno uočiti postojanje objekta u regionu od interesa, što pokazuje da se metode segmentacije zasnovane na regionu, mogu koristiti za detekciju objekata. U sledećem koraku, izvršena je fuzija slika, kako bi se na termovizijskoj slici prikazao detektovani kolosek (zeleno) i objekat u sceni (ljubičasta) (Slika 3.40 (d)).



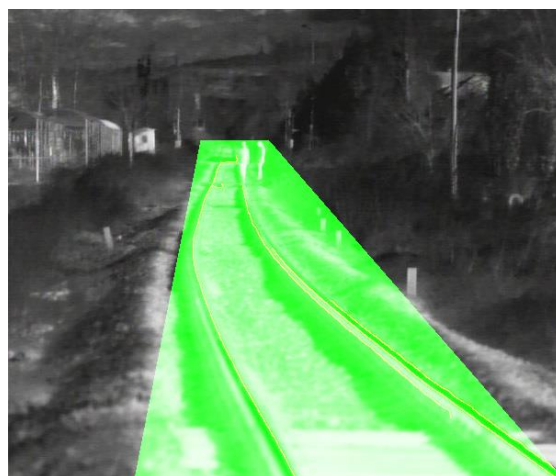
*Slika 3.40 Detekcija objekata na lokaciji u industrijskoj zoni grada: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d) [212]*

U daljim eksperimentima, kao što je ranije navedeno, početkom 2017. godine su vršena testiranja nekoliko objekta, kako bi se odabralo optimalno rešenje. Detekcija potencijalnih prepreka je vršena i na setu termovizijskih slika snimljenih u okviru tih eksperimenata, korišćenjem razvijenog algoritma [161]. Jedna od realnih scena, snimljena termovizijskom kamerom sa fiksnom žižnom daljinom od 100 mm na lokaciji u industrijskoj zoni grada Niša (Slike 3.10. i 3.13), u noćnim uslovima, pri vedrom vremenu, temperaturi od 10°C i relativnoj vlažnosti vazduha od 85 % . je prikazana na slici 3.41 (a), gde se jedan član SMART projektnog tima nalazi na koloseku, dok se drugi nalazi pored koloseka. Nakon detekcije i lokalizacije koloseka (Slika 3.18), a zatim i ekstrakcije, izvršeno je, na napred opisan način, određivanje regiona od interesa, a zatim i obeležavanje tog regiona zelenom bojom i detektovanog koloseka

žutom bojom (Slika 3.41 (b)). U ovoj sceni, specifično je to da je region od interesa ograničen veličinom slike. Zatim, na osnovu iterativno određenog praga, vršena je segmentacija slike, kako bi se detektovao objekat (Slika 3.41 (c)). Rezultati su pokazali da su detektovana dva objekta, koja su, nakon fuzije slika, prikazani roze bojom, dok je ranije detektovani kolosek prikazan zelenom bojom (Slika 3.41 (d)), i da ti objekti predstavljaju potencijalne prepreke. Na osnovu rezultata, može se zaključiti da su tačnost i kvalitet detekcije objekata značajno bolji u odnosu na detekciju u kojoj je korišćena termovizijska kamera FLIR E50. Pored višeg kvaliteta termovizijske slike i korišćenja odgovarajućeg objektiva, tome je doprineo i unapređeni algoritam sa uklanjanjem manjih regiona iz segmentirane slike, koji svakako ne mogu predstavljati objekte u realnoj sceni.



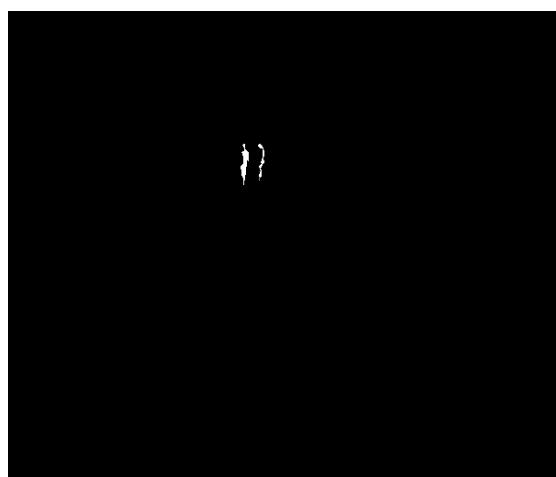
(a)



(b)



(d)

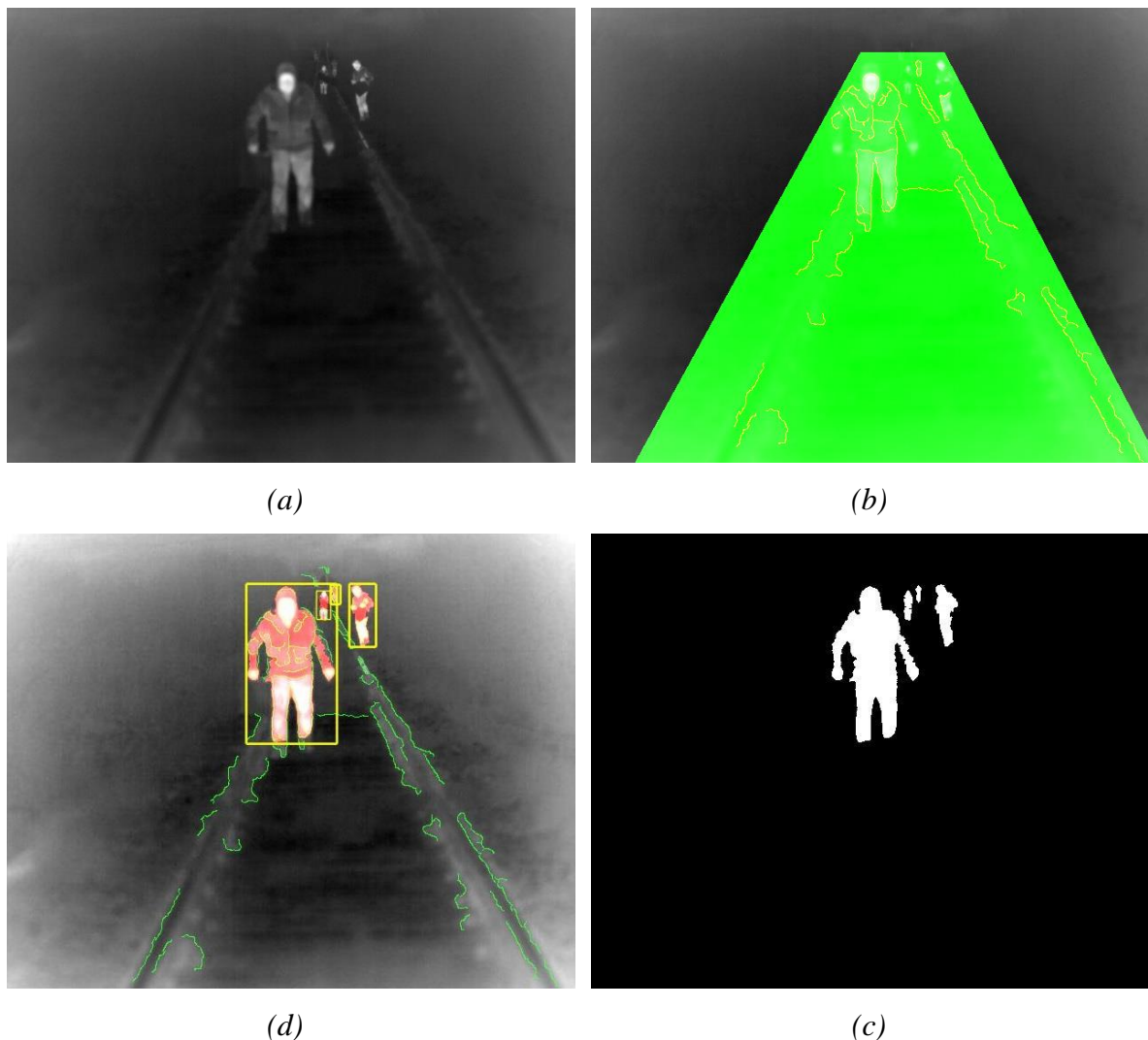


(c)

**Slika 3.41** Detekcija objekata na lokaciji u industrijskoj zoni grada-kamera sa objektivom: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d) [161]

Međutim, dalji eksperimenti, u okviru projekta SMART, realizovani su na lokaciji Babin Potok (Slike 3.22, 3.23, 3.24), tokom 2017. godine, korišćenjem termovizijske kamere FLIR model TAU2. Ova lokacija je veoma značajna sa stanovišta detekcije objekata u noćnim uslovima, jer predstavlja realni scenario u kome u široj okolini železničke infrastrukture ne postoji nijedan objekat niti izvor osvetljenja, a moguće je postojanje objekta u regionu od interesa. Rad algoritma za detekciju objekata, odnosno potencijalnih prepreka, je testiran na setu termovizijskih slika snimljenih u mesecu novembru 2017. godine, u noćnim uslovima uz korišćenje izvora osvetljenja koji odgovaraju uređaju za osvetljavanje kod železničkih vozila. Termovizijska kamera je montirana na visini koja odgovara optimalnom mestu na lokomotivi Srbija Kargo ŽS serije 444 (Slika 3.25). Slike su snimljene na napred navedenoj lokaciji, pri vedrom vremenu, temperaturi od 3,5°C i relativnoj vlažnosti vazduha od 85,4 %.

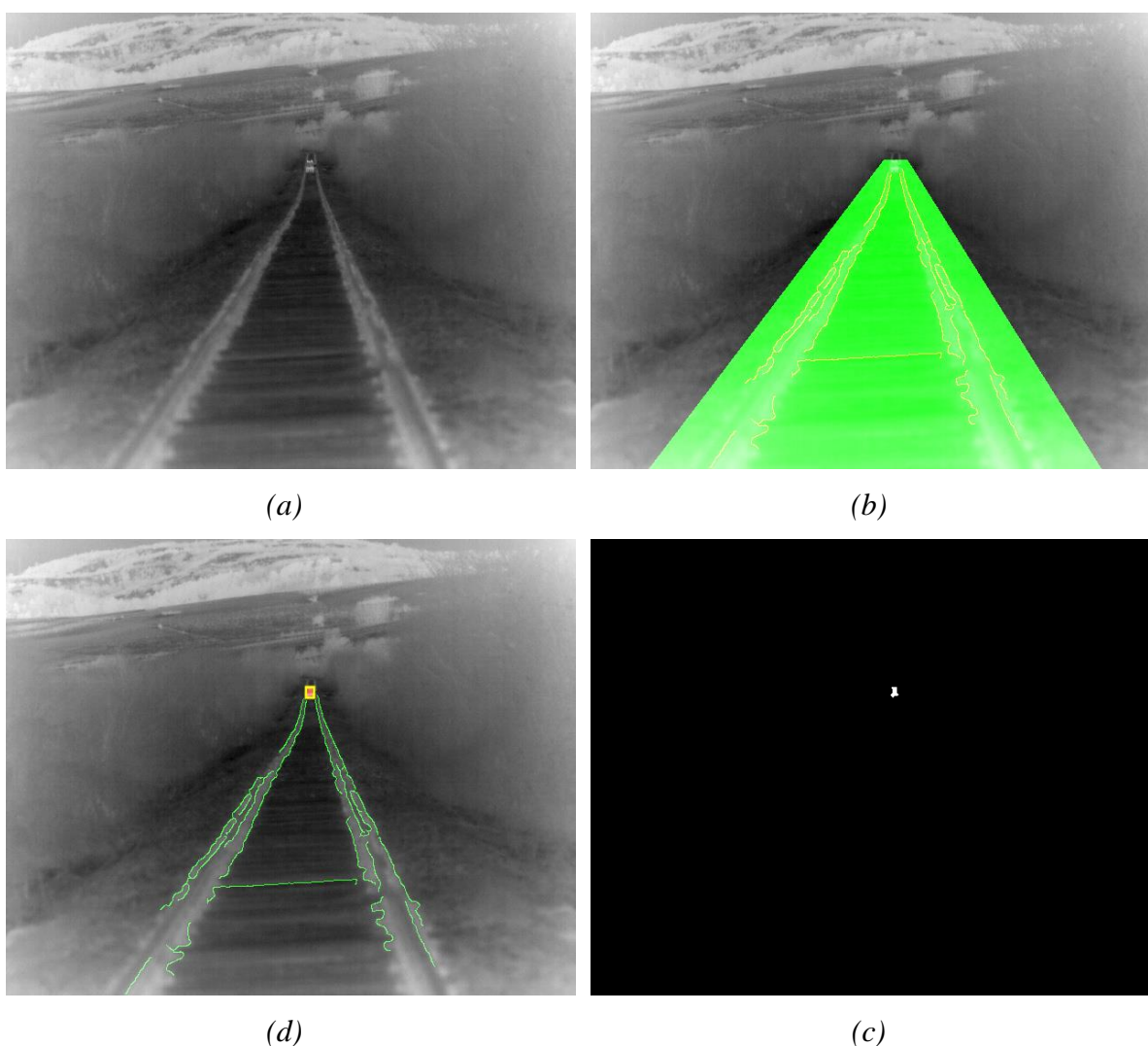
Za detekciju objekata na rastojanjima do 500m, kreiran je scenario u kome su članovi SMART projektnog tima zauzeli pozicije pored koloseka, na samom koloseku i između šina (Slika 3.42 (a)). Članovi tima su bili raspoređeni na rastojanjima u opsegu od 50 do 500 m. Nakon detekcije i lokalizacije koloseka na termovizijskoj slici (Slika 3.27), izvršena je njegova ekstrakcija i određivanje regiona od interesa, kako bi se u tom region detektovali objekti. Detektovani kolosek je označen žutom bojom, a određeni region od interesa je trapeznog oblika i označen je zelenom bojom (Slika 3.42 (b)). U regionu od interesa, izvršena je segmentacija zasnovana na regionu, pri čemu je optimalan prag određen iterativno i podešen ručno. Međutim, susedni regioni binarne slike su povezani morfološkim zatvaranjem praznina između regiona i izgladivanjem njihovih spoljašnjih ivica strukturnim elementom u obliku diska. Problem sa šumom je rešen uklanjanjem svih segmentiranih oblasti manjih od 40 piksela. Rezultati segmentacije (Slika 3.42 (c)) su pokazali prisustvo određenih objekata i to četiri objekta različite veličine, pa je izvršena fuzija slika i detektovani objekti su označeni crvenom bojom i obeleženi žutim četvorouglovima (Slika 3.42 (d)). Rezultati su pokazali da su svi objekti, koji su se nalazili u regionu od interesa, uspešno i ispravno detektovani, i to sa zadovoljavajućim kvalitetom i bez šuma. S obzirom da su objekti detektovani u regionu od interesa, oni predstavljaju potencijalne prepreke.



**Slika 3.42** Detekcija objekata na lokaciji Babin potok: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d) [149].

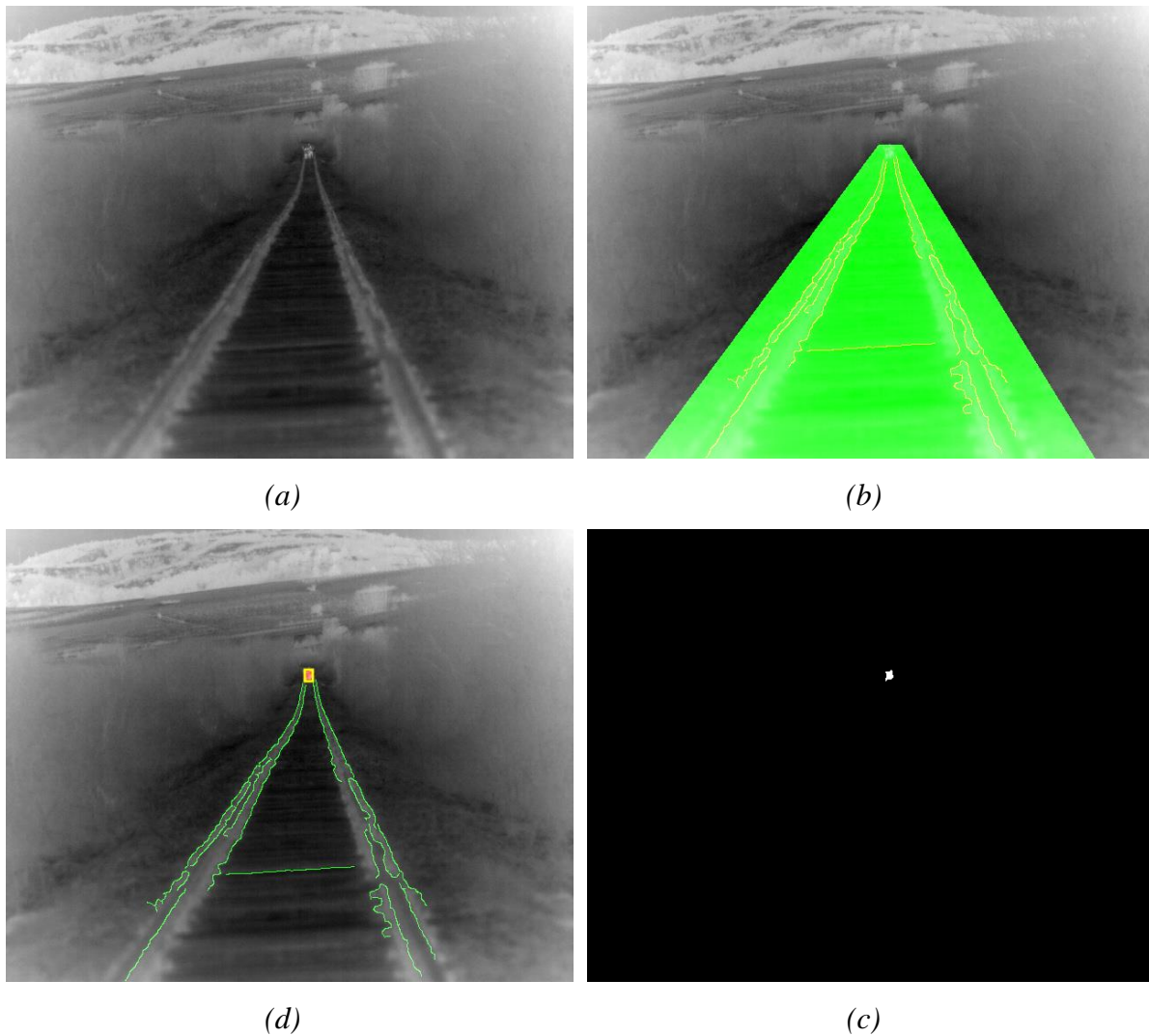
Na istoj lokaciji, realizovan je eksperiment marta 2019. godine, kako bi se detektovali objekti na rastojanju do 1000m, i to u noćnim uslovima. Kako bi se proverila robustnost algoritma, eksperiment je realizovan u uslovima vedrog vremena i temperature od 18°C, jer su prethodni eksperimenti realizovani pri nižim temperaturama vazduha. Kao i u prethodno opisanom eksperimentu, korišćeni su odgovarajući izvori osvetljenja, a termovizijska kamera je bila postavljena na visini od 1,5 m. Eksperimentom, u okviru projekta SMART, je predviđen set scenarija u kojima tri objekta-članova tima zauzimaju različite pozicije na koloseku u opsegu od 400 do 950 m. Na slikama 3.43, 3.44, 3.45 i 3.46 su prikazani rezultati četiri scenarija detekcije objekata, i to na rastojanjima od 625 m, 750 m, 850 m i 935 m, redom. Za svaki scenario u ovom eksperimentu je detekcija objekata sadržala sledeće korake:

- detekcija i lokalizacija koloseka;
- ekstrakcija detektovanog koloseka;
- određivanje i označavanje regiona od interesa na osnovu detektovanog koloseka (Slike 3.43, 3.44, 3.45 i 3.46 (b));
- detekcija objekta korišćenjem metode segmentacije zasnovane na regionu, sa morfološkim zatvaranjem i izgladivanjem strukturnim elementom u obliku diska, a zatim i uklanjanjem šuma (Slike 3.43, 3.44, 3.45 i 3.46 (c)).
- fuzija slika i označavanje detektovanog koloseka i detektovanih objekata (Slike 3.43, 3.44, 3.45 i 3.46 (d)).

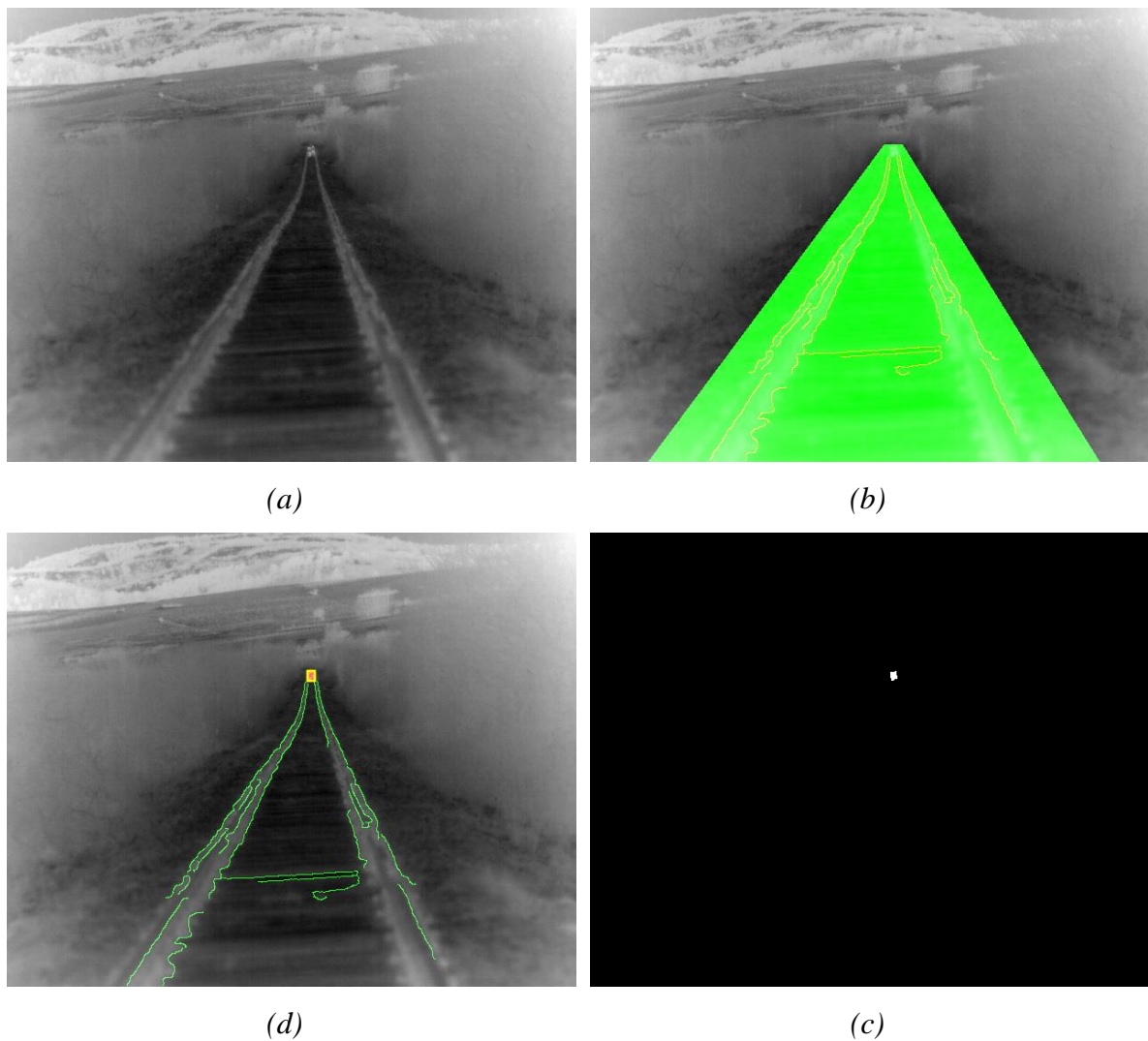


**Slika 3.43** Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom na rastojanju od 625m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)

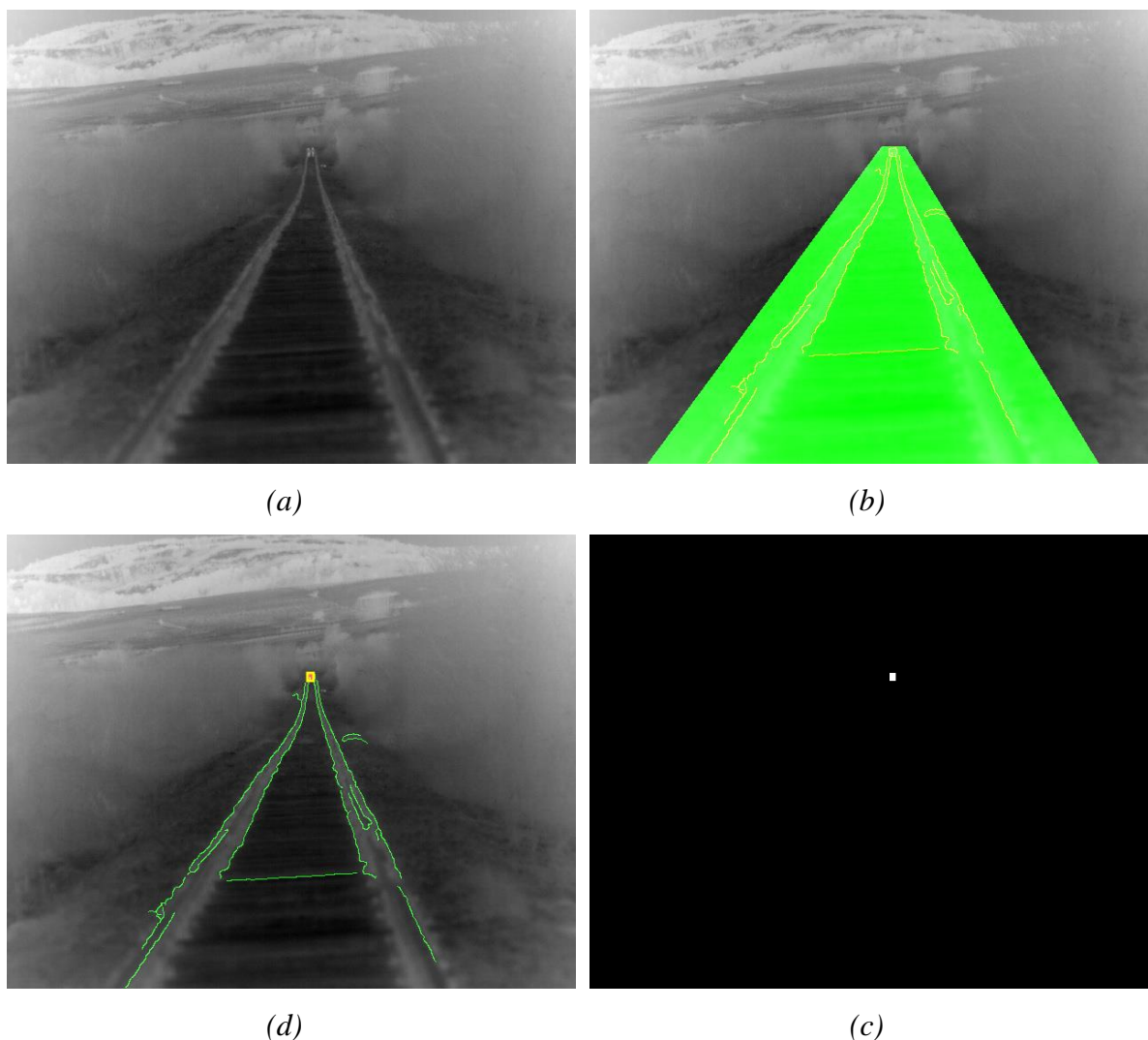




**Slika 3.44** Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenarij sa objektom na rastojanju od 750m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)



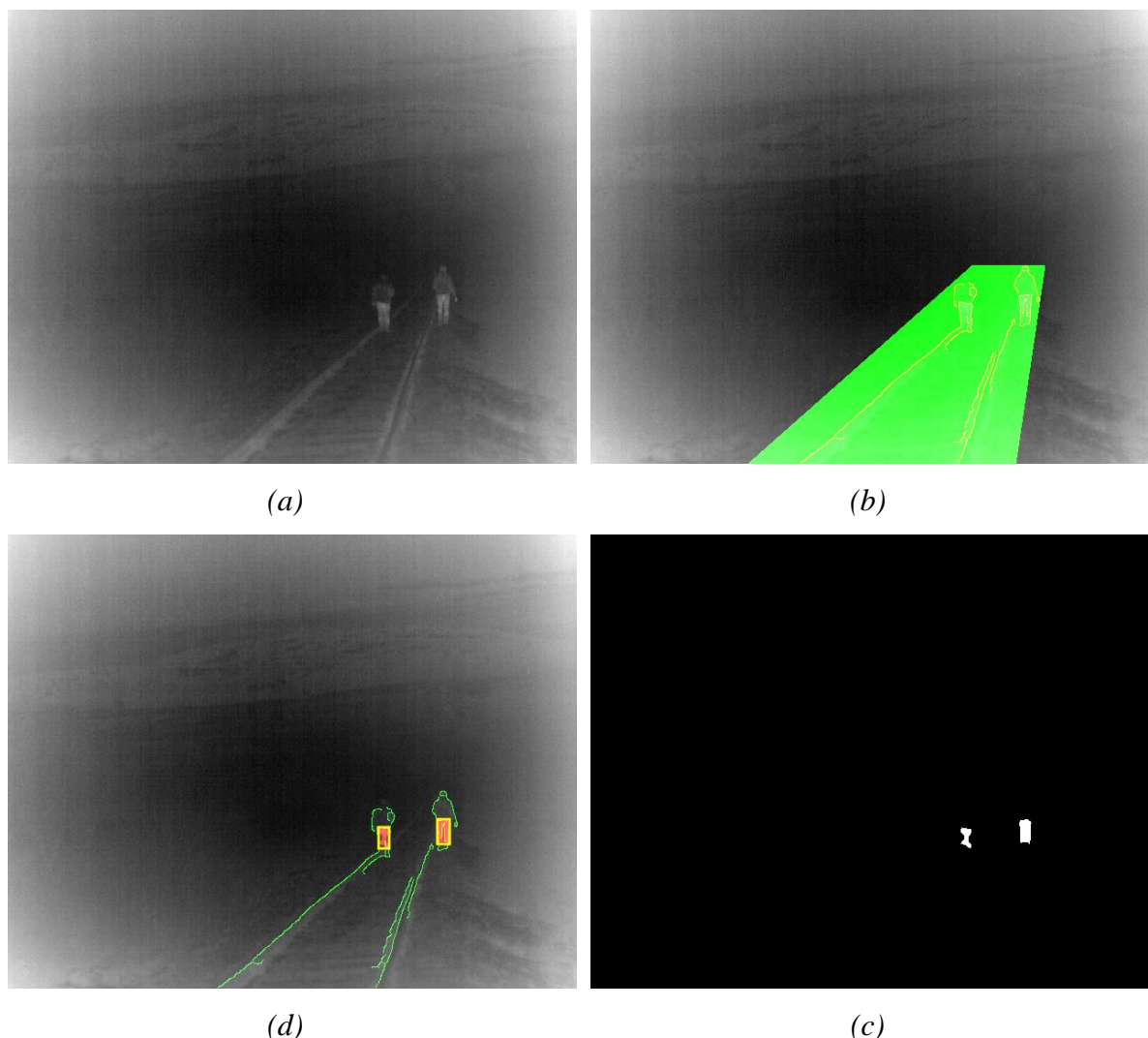
**Slika 3.45** Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenarij sa objektom na rastojanju od 850m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)



**Slika 3.46** Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom na rastojanju od 935m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)

Rezultati detekcije objekata na rastojanjima u opsegu od 400-950m su pokazali da je algoritam veoma robustan i da može da postigne zadovoljavajuće rezultate, čak i pri višim temperaturama vazduha. Algoritam je uspešno i ispravno detektovao, a zatim označio objekte koji su se nalazili u regionu od interesa, i to na velikim rastojanjima od same kamere. Međutim, iako su u svim scenama bila tri objekta, rezultati detekcije pokazuju samo jedan objekat. Uzrok tome je kvalitet (rezolucija) kamere i snimljenih slika. Pored toga, objekti su bili jedan pored drugog na relativno malim međusobnim rastojanjima, kako bi se nalazili između šina, a često su se, prilikom hodanja po koloseku, i „preklapali” u sceni, što je u razgovoru sa članovima tima, koji su učestvovali u eksperimentu, i potvrđeno. Bez obzira na to što je detektovan samo jedan objekat, kako se nalazi u regionu od interesa, predstavlja potencijalnu prepreku.

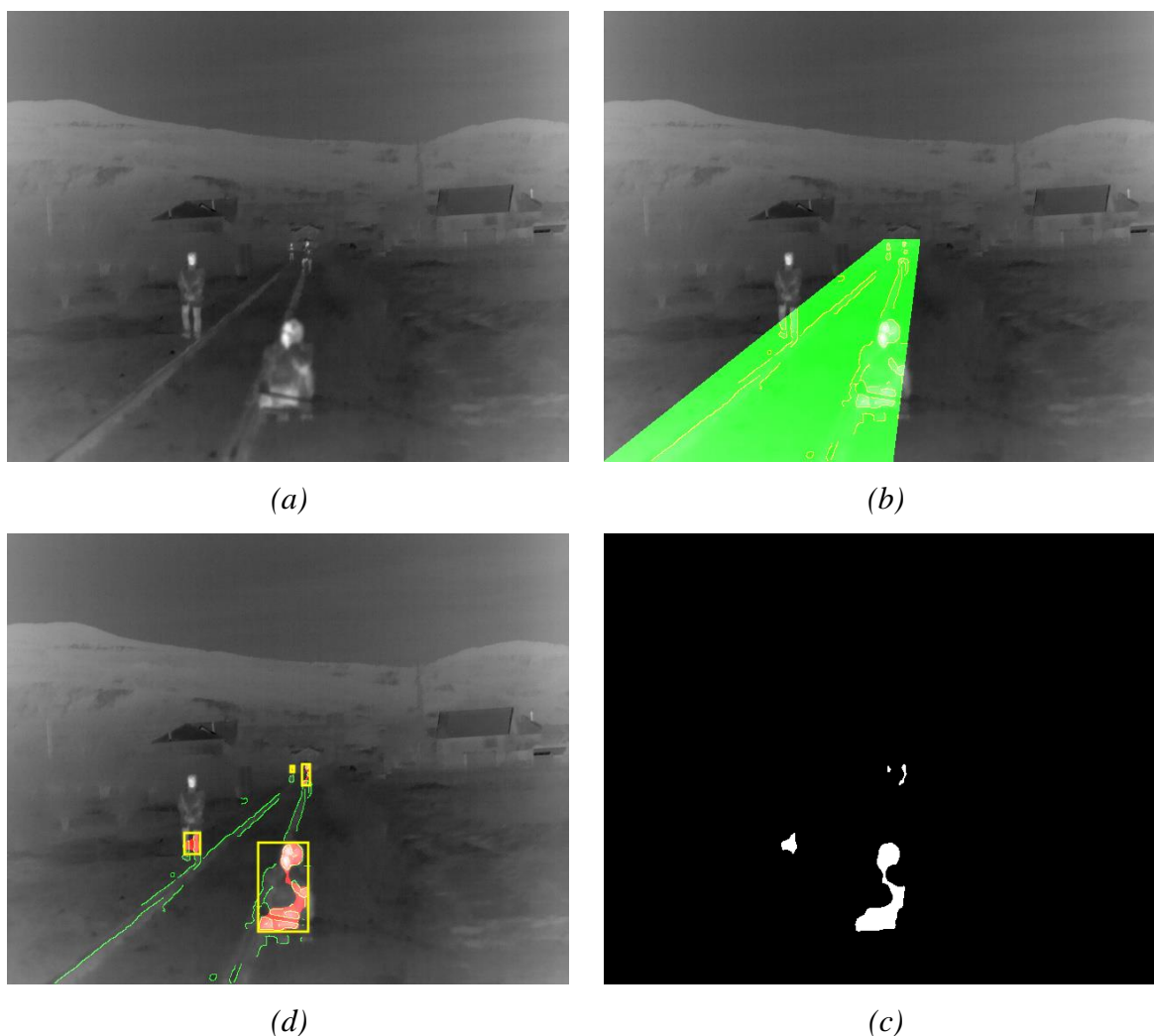
Kako je jedan od mogućih scenarija i detekcija objekata u noćnim uslovima i to kada je vidljivost dodatno smanjena, vršeni su eksperimenti novembra 2018. godine. Prilikom eksperimenta na lokaciji Babin Potok u noćnim uslovima, pri temperaturi vazduha od 1°C, bio je prisutan i snežni pokrivač na i u okolini koloseka (Slika 3.29). Pored toga, relativna vlažnost vazduha je bila visoka, uz prisustvo magle, koja je značajno doprinela smanjenju vidljivosti. Upravo je to odgovaralo realnom scenariju, pa su, nakon postavljanja opreme kao u prethodnim eksperimentima, članovi SMART projektnog tima zauzeli poziciju na rastojanju od 150 m od termovizijske kamere i to tako da jedan bude sa unutrašnje strane, a drugi član sa spoljašnje strane koloseka (Slika 3.47 (a)). Za detekciju objekata je korišćen razvijeni algoritam koji je, na osnovu detektovanog koloseka, odredio i obeležio region od interesa (Slika 3.47 (b)), a zatim i segmentirao sliku, pri čemu je prag određen iterativno i podešen ručno (Slika 3.47 (c)). Detektovana su dva objekta, koja su, nakon fuzije slika, obeležena crvenom bojom i žutim četvorouglovima (Slika 3.47 (d)), pa se može reći da je detekcija uspešna i tačna, i da objekti jesu potencijalne prepreke. Zanimljivo je da su detektovani samo donji delovi objekata i da je prilikom segmentacije bio prisutan relativno visok šum, koji je uklonjen na prethodno opisan način. Uzrok tome je visoka vlažnost vazduha i prisustvo magle, što je dovelo do povećanja koncentracije čestica aerosoli u vazduhu, ali i do delimične pojave kondenzata na garderobi članova tima. To je uticalo na promenu emisivnosti, pa su vrednosti nivoa intenziteta piksela na slici bili u veoma uskom opsegu. Iako su objekti detektovani na malom rastojanju, treba uzeti u obzir da je vidljivost objekata i u dnevnim uslovima, uz prisustvo magle, značajno otežana. Prema tome, uzimajući u obzir veoma specifične vremenske uslove, kvalitet detekcije objekata je zadovoljavajući, a razvijeni algoritam za detekciju objekata je pokazao odgovarajuću robustnost čak i u ovakvim uslovima.



*Slika 3.47 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario u lošim vremenskim uslovima: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)*

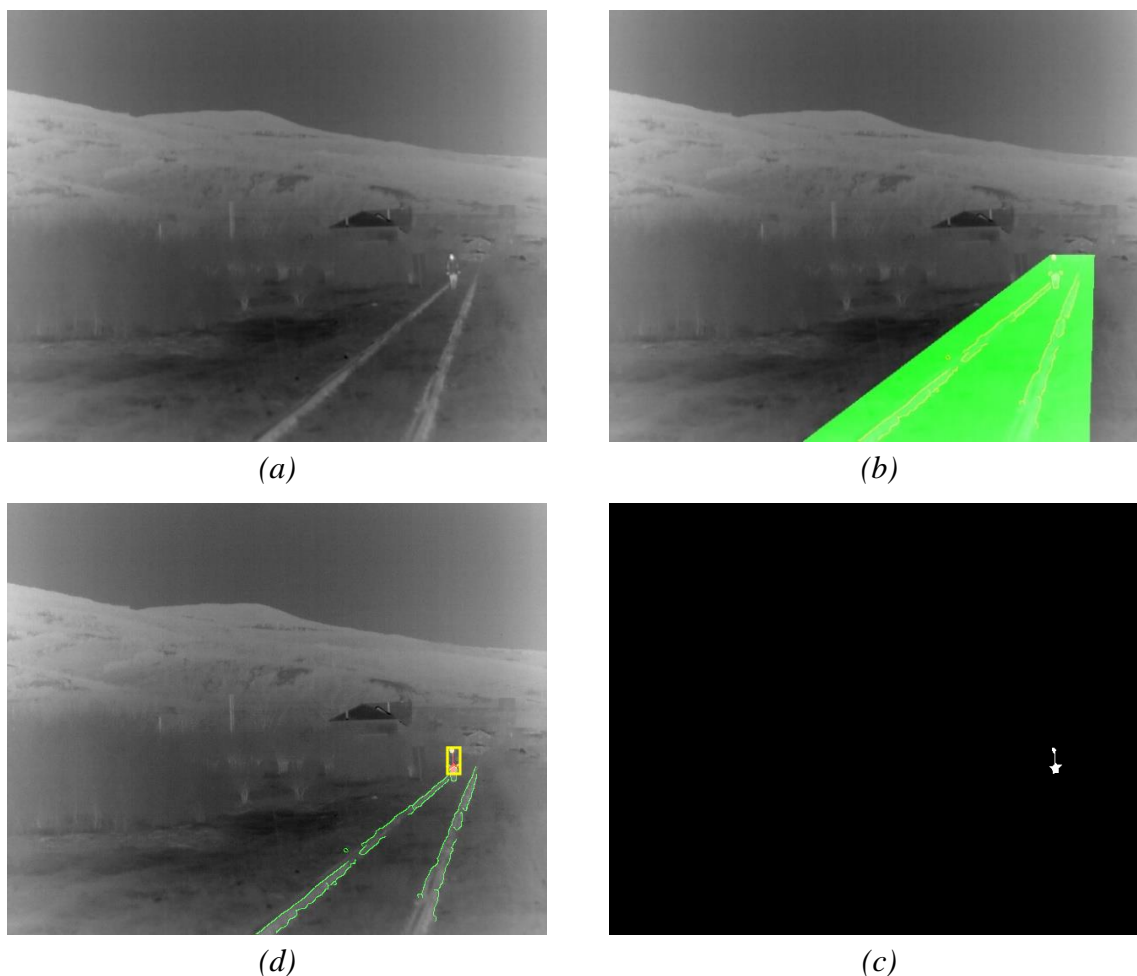
Razvijeni algoritam, u sprezi sa kamerom FLIR model TAU2, je pokazao zadovoljavajuće rezultate detekcije potencijalnih prepreka u različitim uslovima na lokaciji Babin Potok. Ipak, kako bi se proverila tačnost i kvalitet detekcije potencijalnih prepreka, a time i robustnost algoritma u drugim okruženjima, vršeni su eksperimenti u noćnim uslovima na lokaciji Žitorađa (Slike 3.33 i 3.34), i to u tri realna scenarija, a kao deo aktivnosti na projektu SMART. Ova lokacija je specifična zato što u okolini ne postoje izvori osvetljenja, ali se nalazi relativno blizu naseljenog mesta, pa se u sceni mogu naći stambeni objekti koji su osvetljeni. Sistem je postavljen, kao i u prethodnim eksperimentima, sa odgovarajućim osvetljenjem, na visini od 1,5 m (Slika 3.36) i usmeren prema naseljenom mestu, a eksperimenti su realizovani u noćnim uslovima, pri vedrom vremenu i temperaturi od 8°C.

U prvom scenariju, četiri člana SMART projektnog tima su bila na rastojanjima u opsegu od 50 do 500m od sistema-termovizijske kamere i to tako da se nalaze na samom koloseku i pored njega (Slika 3.48(a)). Može se primetiti da na digitalnoj slici ove scene (Slika 3.37 (a)), nije moguće uočiti ni jedan objekat u sceni. Dalje, region od interesa je određen i obeležen na osnovu prethodno detektovanog i lokalizovanog koloseka (Slika 3.48 (b)). Segmentacijom, a zatim i fuzijom uspešno i tačno su detektovana i obeležena četiri objekta (Slika 3.48 (c) i (d)). Analizom rezultata, može se uočiti da detektovani objekti jesu potencijalne prepreke, ali je u slučaju jednog objekta, na levoj šini koloseka, detektovan samo njegov deo. Međutim, na slici 3.48 (b) se primećuje da se taj objekat nalazi samo delimično u regionu od interesa, pa je detekcija samo jednog njegovog dela sasvim ispravna. Dakle, rezultati detekcije potencijalnih prepreka u scenariju na ovoj lokaciji su zadovoljavajući.



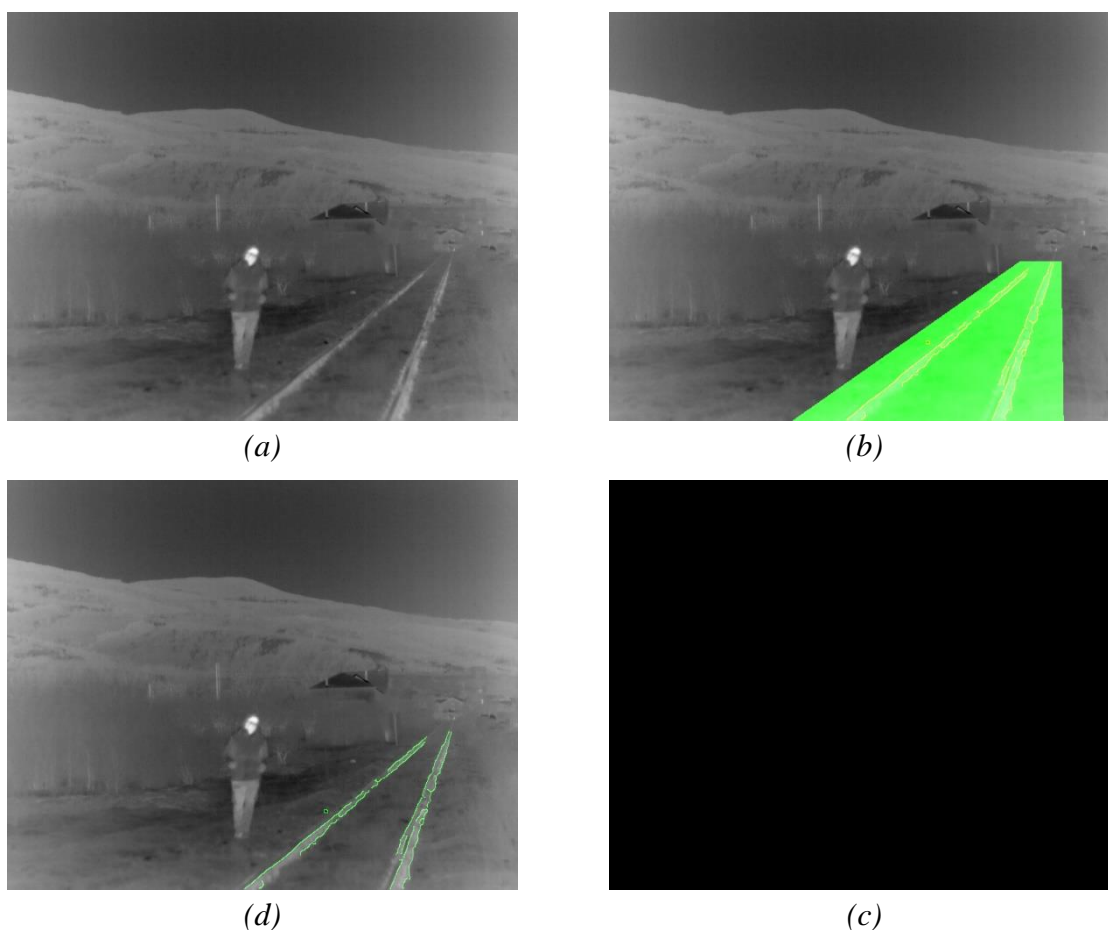
**Slika 3.48** Detekcija objekata na lokaciji Žitorada-scenario sa više objekata: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)

Drugi scenario ovog eksperimenta je obuhvatao detekciju jednog objekta koji se nalazi na koloseku. Član SMART projektnog tima se nalazio na rastojanju od oko 400 m od postavljenog sistema (Slika 3.49 (a)). Takođe, na digitalnoj slici i ove scene (Slika 3.38 (a)), nije moguće uočiti ni jedan objekat u sceni. Cilj ovog scenarija je bio da se proveriti da li će, s obzirom na postojanje stambenih objekata u pozadini, doći do „stapanja” objekta sa okolinom ili pozadinom ili ne, a time i oceniti kvalitet detekcije. Međutim, iako su veoma slične vrednosti nivoa intenziteta piksela koji pripadaju regionu čoveka i regionima stambenih objekata, deo algoritma koji vrši morfološko zatvaranje praznina između regiona i izgladivanje njihovih spoljašnjih ivica strukturnim elementom u obliku diska, obezbedio je da bude detektovan samo čovek, a okolni regioni su uspešno uklonjeni (Slika 3.49 (c)). Prema tome, na osnovu prikazanih rezultata na slici 3.49 (d), može se zaključiti da je detekcija izvršena uspešno i tačno, i da objekat predstavlja potencijalnu prepreku, a kvalitet detekcije je zadovoljavajuć.



**Slika 3.49** Detekcija objekata na lokaciji Žitorađa-scenario sa jednim objektom na velikom rastojanju: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d)

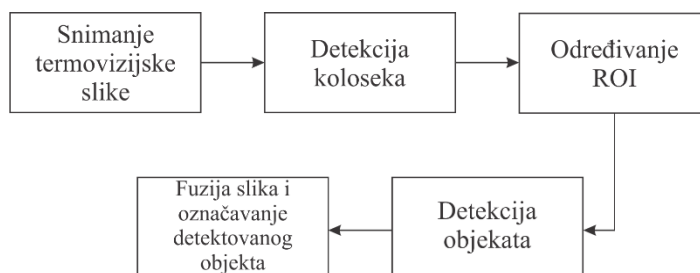
Još jedan specifičan scenario, a treći u okviru ovog eksperimenta na lokaciji Žitorada, je i kada se u sceni nalazi objekat, ali je udaljen od koloseka (Slika 3.50 (a)). To znači da, ako se nalazi u regionu od interesa, treba biti detektovan kao potencijalna prepreka ali, ako se ne nalazi u regionu od interesa, ne treba biti detektovan jer, iako je u sceni, ne predstavlja potencijalnu prepreku. Nakon određivanja i označavanja regiona od interesa (Slika 3.50 (b)), izvršena je segmentacija slike, međutim nijedan objekat u regionu od interesa nije izdvojen (Slika 3.50 (c)). Fuzijom slika, dobijena je slika na kojoj je prikazan samo detektovan kolosek (Slika 3.50 (d)). Zapravo, to znači da u regionu od interesa ne postoji nijedan objekat koji je detektovan kao potencijalna prepreka. Međutim, detaljnim pregledom slike 3.50 (b), može se uočiti da u određenom regionu od interesa zaista ne postoji nijedan objekat, već se član SMART projektnog tima nalazi van regiona. Prema tome, algoritam je pokazao zadovoljavajuće rezultate i odgovarajuću robustnost čak i u ovom scenariju, jer nije detektovao objekat koji se nalazi u sceni, ali je njegova pozicija van određenog regiona od interesa.



**Slika 3.50** Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom van regiona od interesa: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan samo kolosek na termovizijskoj slici (d)



Istraživanjem je obuhvaćeno ispitivanje mogućnosti korišćenja termovizijskog sistema za potrebe detekcije potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture. U okviru toga su realizovani eksperimenti na terenu sa ukupno 22 realna scenarija na četiri različite lokacije koristeći tri termovizijske kamere. U toku istraživanja, kako bi se utvrdile prednosti i mane termovizijskog sistema, eksperimenti su vršeni u različitim vremenskim uslovima i uslovima osvetljenja, i različitim pozicijama sistema. Pored toga, razvijen je algoritam za detekciju potencijalnih prepreka koji nakon snimanja termovizijske slike vrši detekciju koloseka korišćenjem Canny detektora ivica, a zatim, na osnovu detektovanog koloseka, vrši određivanje regiona od interesa. U tom regionu, vrši se detekcija objekata, a zatim fuzija ulazne slike i rezultata detekcije, kako bi se detektovan objekat označio kao potencijalna prepreka. Blok dijagram detekcije potencijalnih prepreka termovizijskim sistemom je prikazan na slici 3.51.



**Slika 3.51** Blok dijagram detekcije termovizijskim sistemom

Rezultati istraživanja su pokazali da termovizijski sistem može da se koristi kao deo sistema mašinske vizije za detekciju potencijalnih prepreka na manjim i većim udaljenostima, konkretno kada su objekti/prepreke ljudi. U dobrim vremenskim uslovima, kvalitet detekcije je bio dobar sa prisutnim manjim šumom, što je sasvim razumljivo, uzimajući u obzir uslove na terenu. Međutim, kao što je i očekivano, pokazalo se da je rad termovizijskog sistema otežan u veoma lošim vremenskim uslovima, odnosno kada je na terenu prisutna magla i kada je visoka vlažnost vazduha, jer se menja emisivnost objekata u sceni. U tim uslovima, kvalitet snimljene termovizijske slike značajno opada. Sa druge strane, razvijeni algoritam zasnovan na metodama segmentacije, je pokazao robustnost i zadovoljavajuće rezultate detekcije u različitim scenarijima, pri čemu je kvalitet detekcije, pre svega, zavisio od kvaliteta ulazne termovizijske slike.

### 3.2. Detekcija i prepoznavanje koloseka i objekata primenom sistema noćne vizije

Sistem mašinske vizije, predstavljen u ovoj doktorskoj disertaciji, pored termovizijske kamere, poseduje i sistem noćne vizije, kako bi se vršila detekcija potencijalnih prepreka u odgovarajućem regionu od interesa, i to u noćnim uslovima. Sistem noćne vizije, za razliku od termovizijske kamere, ne zavisi od temperature objekta i okruženja, odnosno od razlike njihovih temperatura, već od količine svetlosti prisutne u okolini. Prema tome, ovaj sistem omogućava vidljivost objekata u sceni, čak i u slučaju da okruženje i objekat imaju iste ili približno iste vrednosti temperature, pri čemu je potrebno da u okolini postoji mala ali dovoljna količina svetlosti. Upravo zbog takvih karakteristika, sistem noćne vizije predstavlja integralni deo sistema mašinske vizije za detekciju potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture.

Sistem noćne vizije, korišćen u eksperimentima, je razvijen u okviru projekta SMART. Ovaj sistem sadrži četiri glavna dela: objektiv, pojačavač slike, optički elementi za sprezanje i CMOS kamera (Slika 3.52). Objektiv i pojačavač slike su proizvodi kompanije HD SOVA iz Niša, koja je bila učesnik na projektu SMART. Ista kompanija je sklop optičkih elemenata za spajanje posebno izradila za potrebe projekta, a CMOS kamera je proizvod kompanije The Imaging Source [215].



*Slika 3.52 Sistem noćne vizije*

Kao i kod svakog sistema noćne vizije, i ovaj sistem mora da ima što je moguće manju vrednost otvora blende  $f$ . Ovo je neophodno, s obzirom da je u uslovima malog osvetljenja važno sakupiti što je više moguće svetla iz okoline. Drugi zahtev za ovakav sistem jeste da ima

žižnu daljinu dovoljnu da formira sliku dovoljne veličine na fotokatodi. Oba zahteva ispunjavaju 6x objektiv sa 170 mm žižne daljine i otvor blende  $f/1.7$ . Žižna daljina je fiksna što omogućava pouzdan i tačan rad [215].

Kako je pojačavač slike najosetljivija komponenta sistema noćne vizije, izabran je pojačavač slike treće generacije sa rezolucijom od više od 64 pari linija po milimetru i auto-gating funkcijom napajanja koja omogućava da se koristi u promenljivim uslovima osvetljenja sa visokim dinamičkim opsegom. Dužina pojačavača slike je 304 mm [215].

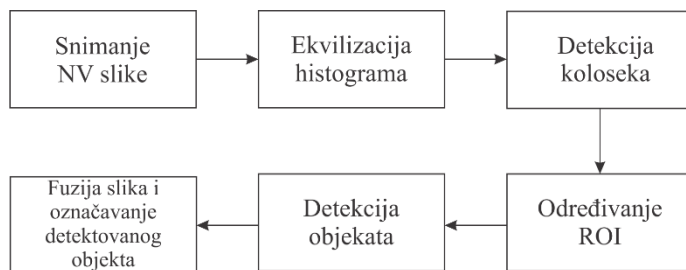
Međutim, pojačivači slike su analogni uređaji na kojima se slika prikazuje na fosfornom ekranu, stoga je bilo potrebno pretvoriti ovu sliku u digitalnu, kako bi se u daljim koracima vršila njena obrada. To se postiže snimanjem izlaznog ekrana pomoću of-the-shelf kamere i posebno izrađenog optičkog sistema za ovu namenu. Sklop optičkih elemenata za spajanje je fini konjugovani sistem sa sledećim zahtevima: nizak  $f$ -broj (otvor blende) kako bi se omogućilo kraće vreme ekspozicije, kratko ukupno rastojanje između predmeta i slike, rezolucija  $\sim 200$  linijskih parova po milimetru da bi se iskoristio puni potencijal pojačivača, i uvećanje od  $\sim 0,32$  da bi se omogućila puna širina pojačivača slike na senzoru. Sklop je proizvod kompanije HD Sova i omogućava povezivanje pojedinih komponenti senzora, kao i zatvaranje i funkcionisanje sistema u neidealnim uslovima okruženja (npr. mraz, velika vlaga, prašina, itd.) [215].

Za potrebe sistema noćne vizije, izabrana je monohromatska industrijska kamera Imaging Source DMK 33GP031 GigE [215, 218]. S obzirom da treba da prikazuje samo fosforni ekran koji daje zelenu sliku, izabrana je monohromatska kamera. Rezolucija kamere je  $2592 \times 1944$  piksela, sa veličinom piksela od  $2.2 \times 2.2 \mu\text{m}$ , i 15 fps. Dimenzije kamere su  $29 \times 29 \times 57$  mm, sa masom od 65 grama. Temperaturni radni uslovi su  $-5^\circ\text{C}$  do  $45^\circ\text{C}$ , u opsegu vlažnosti od 20 % - 80 % bez kondenzacije [218]. Kamera se nalazi u robustnom kućištu a, s obzirom da je sklop za spajanje projektovan tako da projektuje sliku direktno na CMOS senzor, za kameru nije bilo potrebno koristiti objektiv (Slika 3.53). Ovaj model kamere zadovoljava zahteve i izabran je zbog svoje kompatibilnosti sa ostalim sistemima, jer su kamere stereovizijskog modula istog proizvođača, iste rezolucije i istog GigE interfejsa [215].



*Slika 3.53 CMOS kamera [218]*

Prikazani sistem noćne vizije je spregnut sa algoritmom za detekciju potencijalnih prepreka. Za potrebe ispitivanja sistema, eksperimenti su vršeni na dve lokacije u različitim realnim scenarijima, koji su kreirani u različitim vremenskim uslovima, kao i uslovima osvetljenja. Detekcija potencijalnih prepreka je vršena na nizu frejmova snimljenim sistemom noćne vizije, korišćenjem razvijenog algoritma. Blok dijagram detekcije je prikazan na slici 3.54. Nakon snimanja slike prikazanim sistemom, zbog ujednačavanja kontrasta, vršena je ekvilizacija (ujednačavanje) histograma, čime je poboljšan kvalitet ulazne slike. S obzirom da potencijalna prepreka nije svaki objekat koji se nalazi u sceni, bilo je potrebno odrediti region od interesa (ROI). Region sadrži sam kolosek i određene oblasti sa njegove leve i desne strane, pa je bilo potrebno detektovati kolosek i lokalizovati ga u trenutnoj sceni. To je realizovano metodom segmentacije zasnovane na regionu, pri čemu je vrednost praga određivana iterativno i podešavana ručno. Detaljnom analizom slika snimljenim sistemom noćne vizije (u daljem tekstu NV slika) u različitim scenarijima, uočeno je da se kolosek može posmatrati kao zaseban region, jer pikseli koji pripadaju koloseku imaju slične vrednosti nivoa intenziteta. U poređenju sa vrednostima nivoa intenziteta piksela koji ne pripadaju koloseku, uočena je značajna razlika, pa se za detekciju koloseka mogu koristiti metode segmentacije zasnovane na regionu, što je i integrisano u razvijeni algoritam. U sledećem koraku, rezultati detekcije koloseka su korišćeni za određivanje regiona od interesa, prema izrazima (31) i (32), datim u poglavlju 3.1.2 ove doktorske disertacije. Zatim, u ROI je vršena detekcija objekata metodom segmentacije zasnovane na regionu u delu scene, pri čemu je vrednost optimalnog praga određena iterativno i podešavana ručno. Razlog tome je što se, takođe, detaljnom analizom slika, konstatovalo da se objekat može posmatrati kao zaseban region u odnosu na okruženje u sceni. Kako bi bili prikazani rezultati, izvršena je fuzija ulazne slike, rezultata detekcije koloseka i rezultata detekcije objekata. Na toj slici su označeni objekti koji su detektovani, jer svojim prisustvom u regionu od interesa, predstavljaju potencijalnu prepreku bezbednom odvijanju železničkog saobraćaja.



Slika 3.54 Blok dijagram detekcije sistemom noćne vizije

### 3.2.1. Rezultati detekcije i prepoznavanja

U toku marta 2018. godine, vršeni su eksperimenti na lokaciji Žitorada, u okviru projekta SMART. Detaljan opis i prikaz lokacije je dat u poglavlju 3.1.1 ove doktorske disertacije. Specifičnost ove lokacije se ogleda u tome što se nalazi u ruralnoj sredini, i to u nenaseljenom delu, putni prelaz nije osvetljen, ali pored lokacije se nalazi lokalna saobraćajnica. Pored toga, na rastojanju od 820 metara od putnog prelaza, nalaze se stambeni objekti. Zbog toga se, povremeno i delimično, mogla očekivati pojava indirektnog osvetljenja. Ova lokacija je izabrana uzimajući u obzir realne uslove mešovitog okruženja i bezbednosne aspekte realizacije eksperimenata.

Eksperimenti su vršeni u noćnim uslovima, u cilju provere rada razvijenog algoritma za detekciju potencijalnih prepreka sistemom noćne vizije. Pri temperaturi od 2°C, na celoj lokaciji, odnosno na putnom prelazu i duž koloseka, izmerena je količina osvetljenja od 0 luksa. Rad sistema noćne vizije na navedenoj lokaciji je testiran pri vedrom vremenu, tako što je sistem, prikazan na slici 3.55, postavljen na putnom prelazu, na visini od 1,5 metara od tla i usmeren prema naseljenom mestu. Sistem noćne vizije je pozicioniran na levom delu kućišta (označeno crvenim krugom na slici 3.55 (a)), a izvori osvetljenja su postavljeni kako bi imitirali prisustvo uređaja za osvetljavanje kod železničkih vozila (Slika 3.55 (b)).



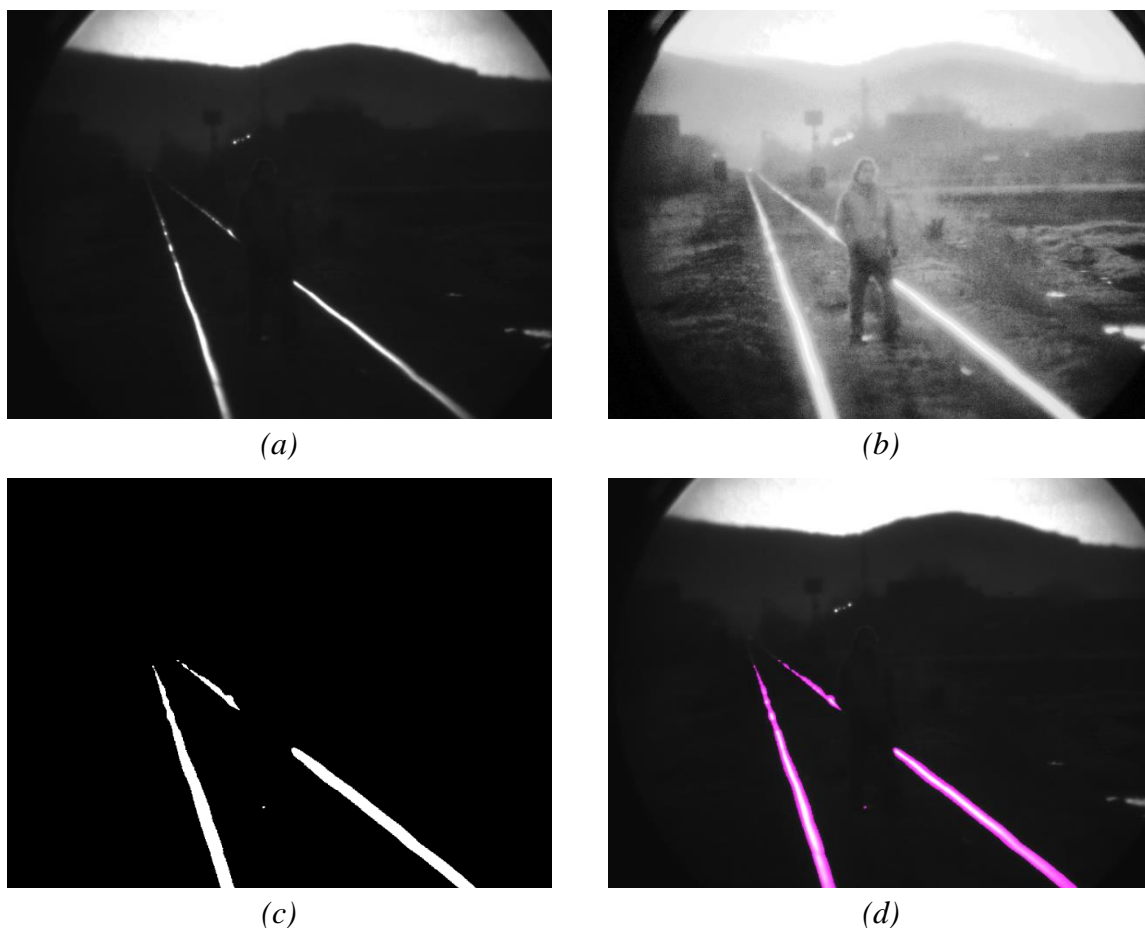
(a)

(b)

Slika 3.55 Postavljanje sistema na lokaciji Žitorada – sistem noćne vizije:  
dnevni uslovi (a), noćni uslovi (b)

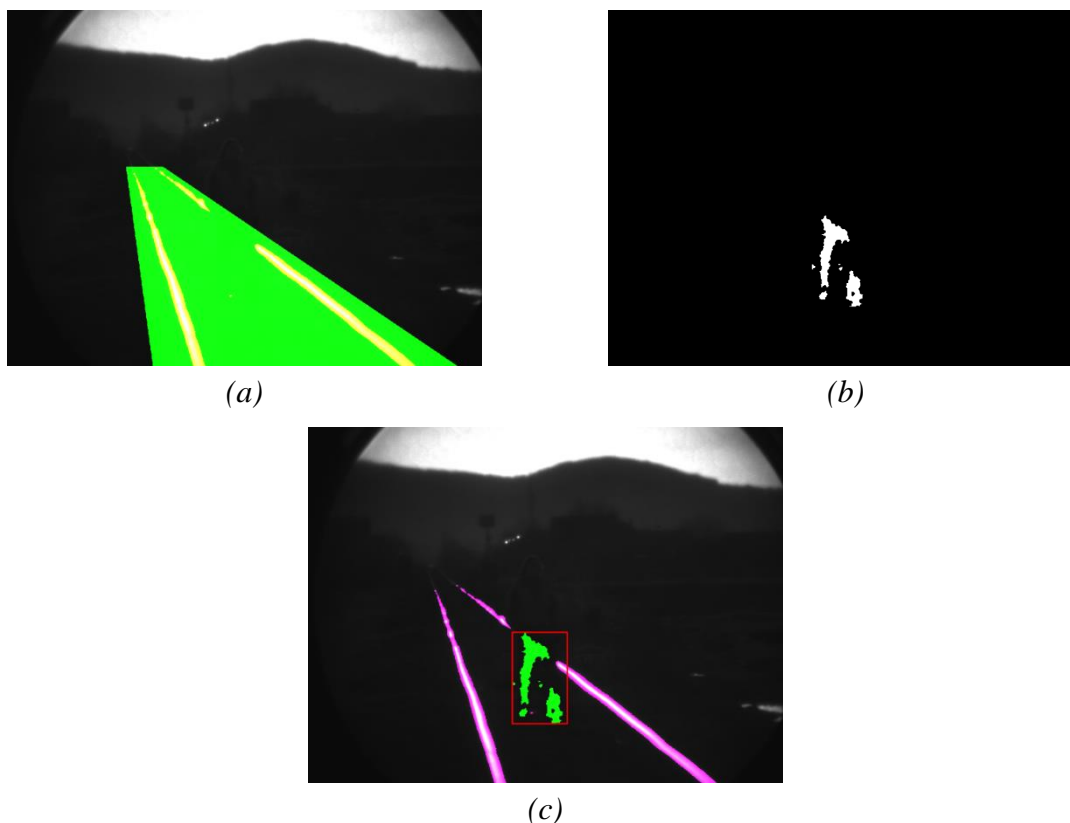
Za potrebe provere rada algoritma osmišljeno je i, u okviru eksperimenata, realizovano ukupno jedanaest realnih scenarija, koji su podeljeni u tri grupe. Scenariji obuhvataju različite varijante prisustva objekata u sceni, pri čemu su objekti bili ljudi, članovi SMART tima.

U prvu grupu spadaju dva scenarija sa jednim objektom-čovekom na dva različita rastojanja od sistema. Prvim scenarijom je predviđeno da se objekat nalazi na rastojanju od 50m od sistema i to tako da je njegova pozicija na koloseku, odnosno između šina. S obzirom na neujednačeni kontrast na NV slici (Slika 3.56 (a)), izvršena je ekvilizacija histograma čime je dobijen rezultat prikazan na slici 3.56 (b). Zatim je vršena detekcija koloseka kako bi se odredio region od interesa. Za detekciju koloseka vrednost praga od 0,8 je određena iterativno i podešena ručno. Segmentirana slika je prikazana na slici 3.56 (c), a rezultat detekcije i lokalizacije koloseka na NV slici je prikazan na slici 3.56 (d). Kolosek je detektovan sa zadovoljavajućom tačnošću, pri čemu se može uočiti prekid u jednom delu, što ukazuje na potencijalno prisustvo objekta u tom delu scene.



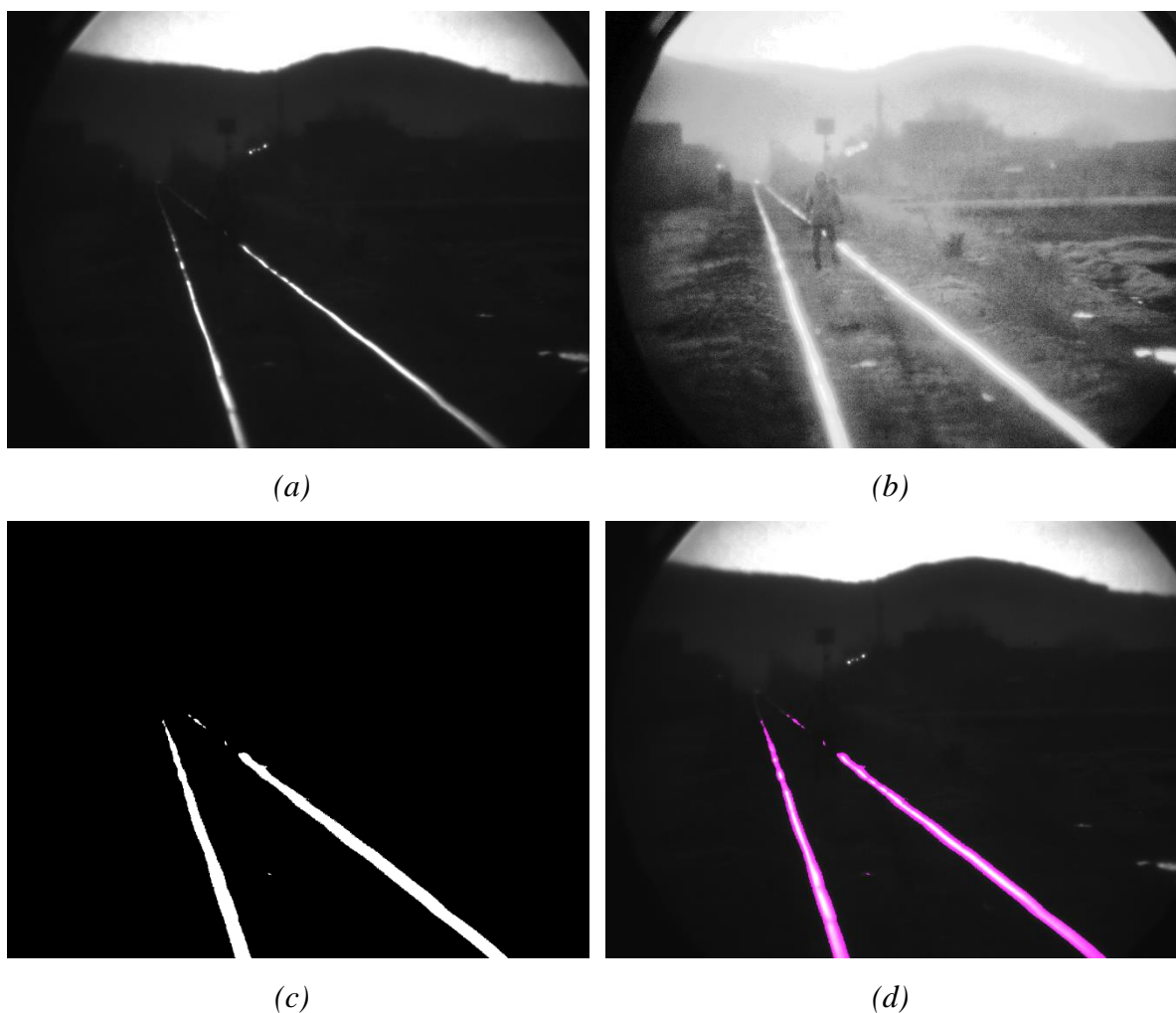
*Slika 3.56* Detekcija koloseka na lokaciji Žitorada – prvi scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d)

Na osnovu rezultata detekcije i lokalizacije koloseka, izvršena je njegova ekstrakcija i određivanje regiona od interesa, na prethodno opisan način, a zatim je označen zelenom bojom, dok je prethodno detektovani kolosek označen žutom bojom (Slika 3.57 (a)). Može se primetiti da se deo objekta nalazi u prikazanom regionu. To je sasvim očekivano, zbog pozicije same kamere, od koje zavisi i na koji način će scena biti snimljena. Dalje, detekcija objekata je vršena segmentacijom slike. Kako bi se uklonio šum, sve segmentirane oblasti manje od 30 piksela su eliminisane. Zatim je izvršeno morfološko zatvaranje praznina između regiona i izgladivanje njihovih spoljašnjih ivica strukturnim elementom u obliku diska. Rezultati segmentacije su prikazani na slici 3.57 (b). Nakon segmentacije, izvršena je fuzija slika, pa je detektovan kolosek prikazan roze bojom, detektovani objekat zelenom bojom i zaokružen crvenim četvorouglo (Slika 3.57 (c)). Rezultati detekcije su pokazali da je objekat, odnosno njegov deo, koji se našao u regionu od interesa uspešno i ispravno detektovan, sa manjim šumom koji je prihvatljiv. Iako postoji prekid u delu objekta, što je razumljivo, s obzirom na veoma različit nivo intenziteta piksela koji pripadaju objektu, detekcija je zadovoljavajuća. Kako se objekat nalazi u regionu od interesa, on svakako predstavlja potencijalnu prepreku.



*Slika 3.57 Detekcija objekata na lokaciji Žitorađa – objekat na rastojanju od 50 m: region od interesa na originalnoj NV slici (a), segmentirana slika (b), detektovan kolosek i objekat na originalnoj NV slici (c)*

U drugom scenariju, objekat je bio na rastojanju od 100 metara, mereno od sistema koji se nalazio na putnom prelazu. Objekat se nalazio na koloseku, sa unutrašnje strane desne šine (Slika 3.58 (a)). Nakon ekvilizacije histograma (Slika 3.58 (b)) izvršena je detekcija koloseka, sa vrednošću praga od 0,8. Rezultat segmentacije (Slika 3.58 (c)) je pokazao da postoji prekid u koloseku što ukazuje na potencijalno postojanje objekta. Detektovan i lokalizovan kolosek je označen roze bojom na NV slici (Slika 3.58 (d)).

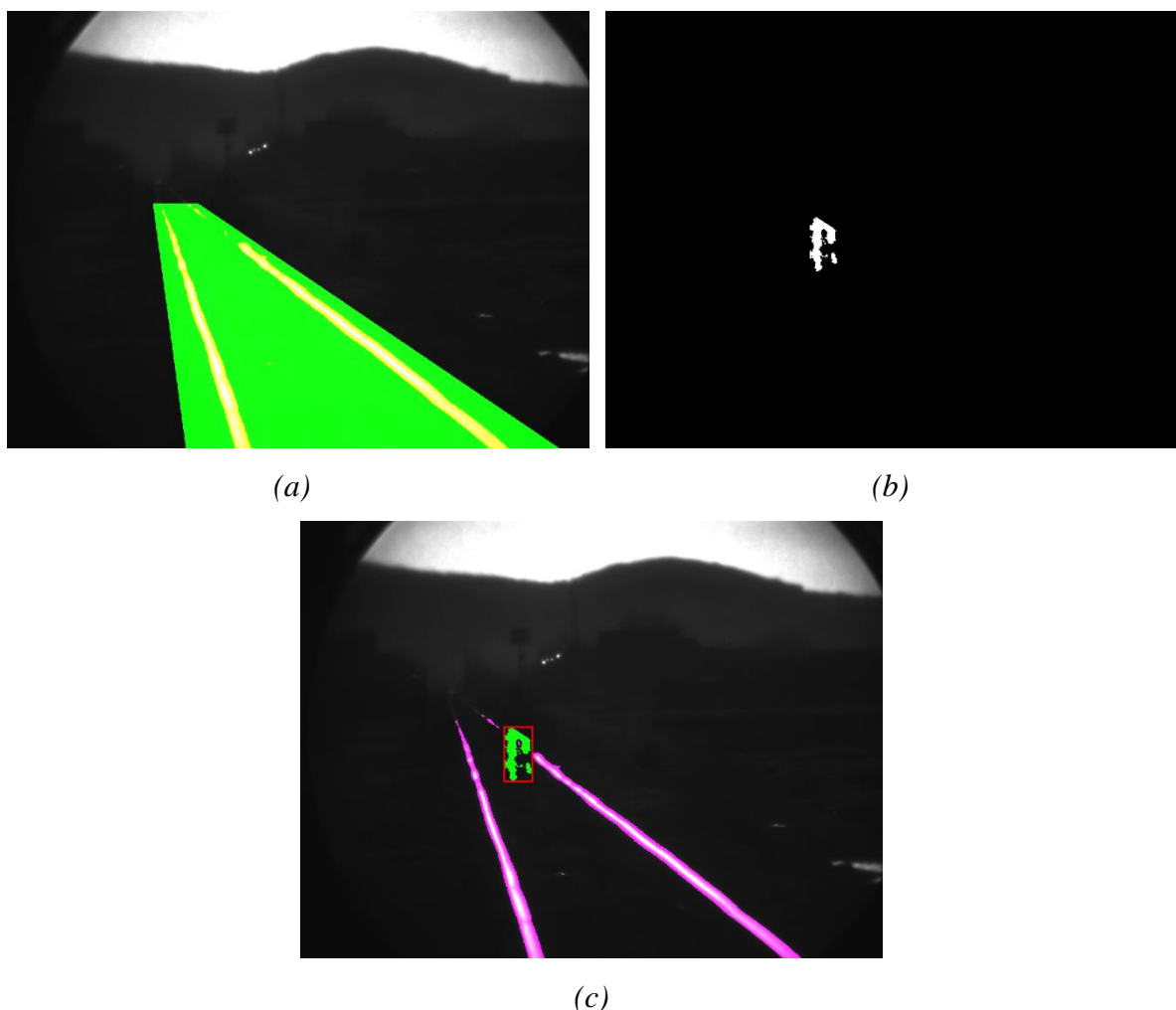


**Slika 3.58** Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa – objekat na 100 m: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d)

U daljem postupku detekcije potencijalnih prepreka na železničkoj infrastrukturi primenom sistema noćne vizije, vršena je detekcija objekata u regionu od interesa. Dakle, na osnovu detektovanog i ekstrahovanog koloseka, određen je region od interesa u sceni i obeležen zelenom bojom (Slika 3.59 (a)). U tom regionu, izvršena je detekcija objekta, pri čemu je, uklanjanjem segmentiranih oblasti manjih od 50 piksela, smanjen šum i postupkom



morfološkog zatvaranja i izgladivanja, dobijen je rezultat segmentacije prikazan na slici 3.59 (b). Fuzijom slika dobijeni su rezultati detekcije koloseka i detekcije objekata, pri čemu je detektovan objekat obeležen zelenom bojom i zaokružen crvenim četvorouglom (Slika 3.59 (c)). Rezultati detekcije su pokazali da se deo objekta koji je detektovan nalazi u određenom regionu od interesa, stoga predstavlja potencijalnu prepreku bezbednom odvijanju železničkog saobraćaja.

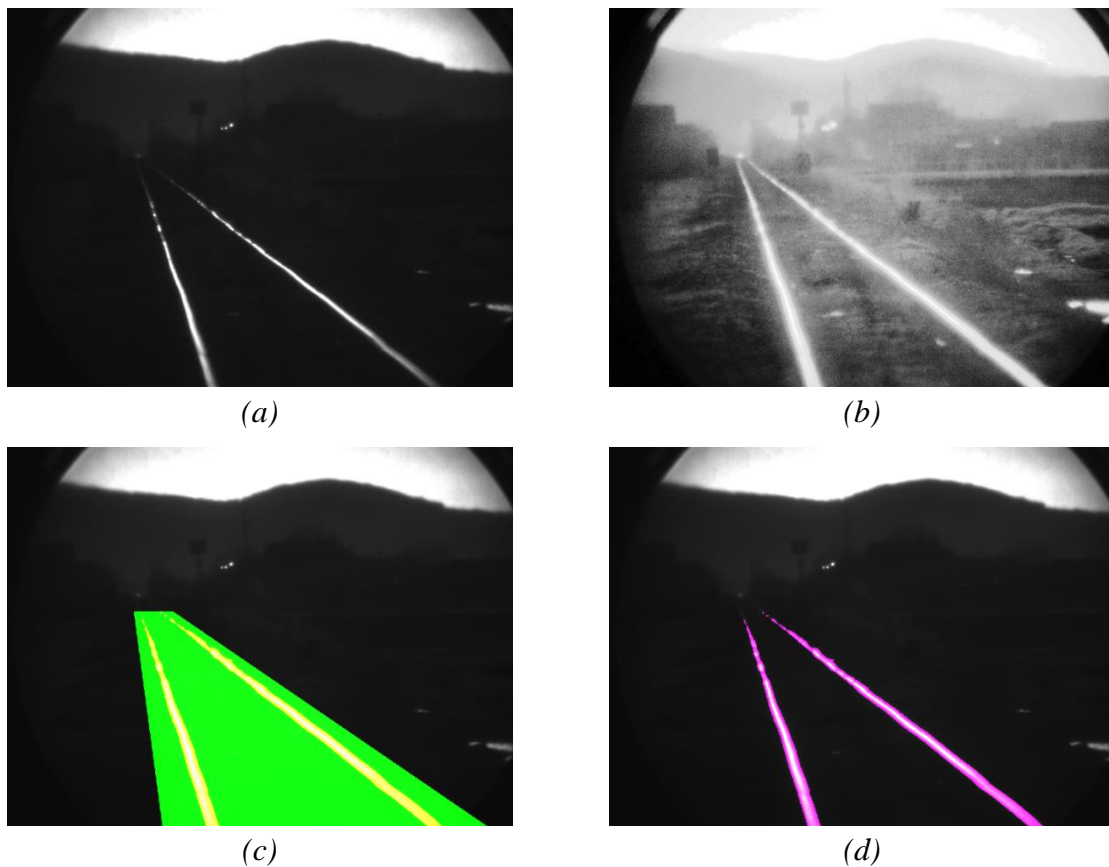


*Slika 3.59 Detekcija objekata na lokaciji Žitorađa – objekat na rastojanju od 50 m: region od interesa na originalnoj NV slici (a), segmentirana slika (b), detektovan kolosek i objekat na originalnoj NV slici (c)*

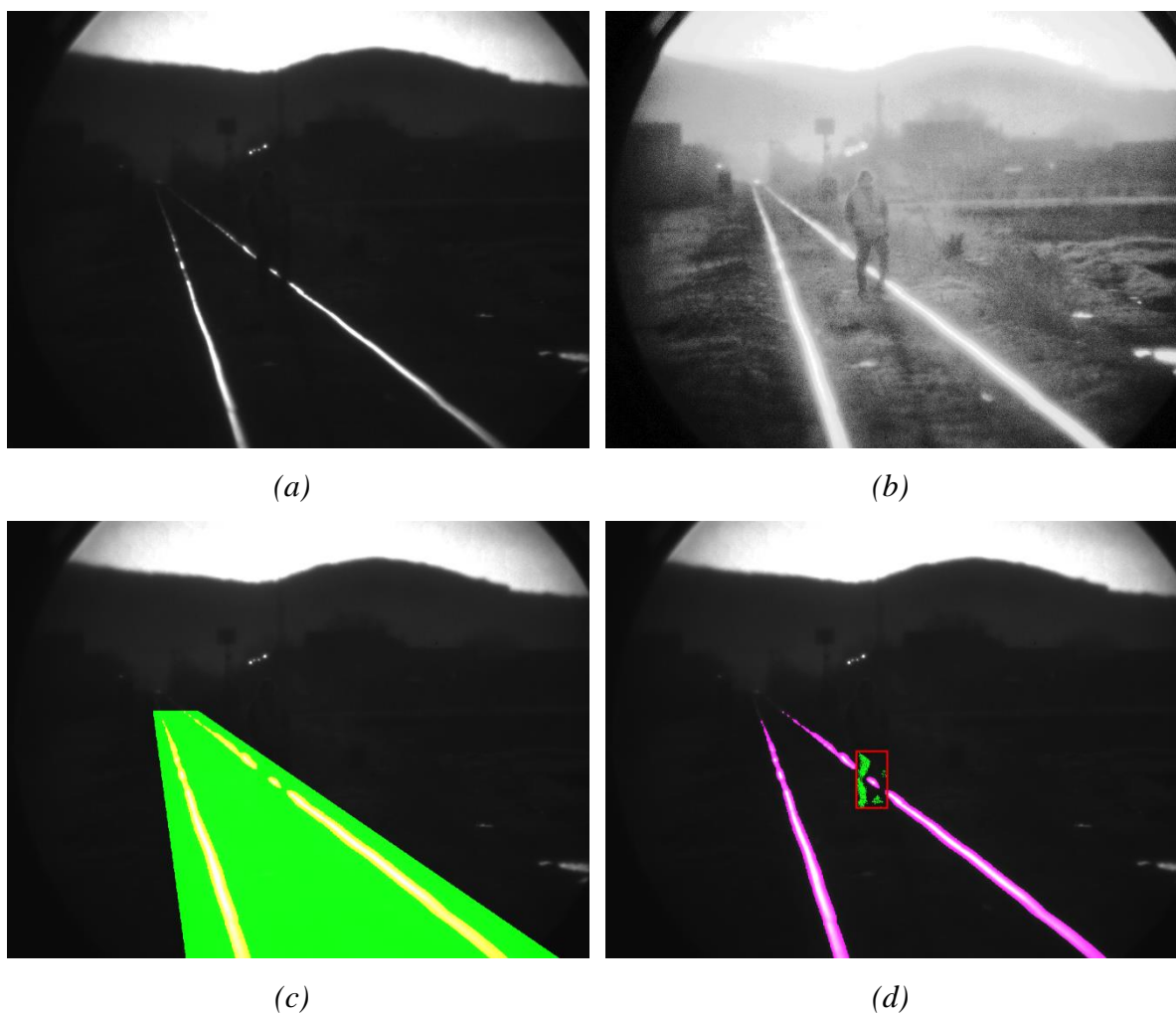
U oba prethodno opisana scenarija, objekat se nalazio na određenoj udaljenosti od sistema noćne vizije, ali se nije ceo objekat nalazio u regionu od interesa. Međutim, delovi objekata koji su se nalazili u ROI su uspešno i ispravno detektovani i obeleženi na odgovarajući način.

Druga grupa scenarija obuhvata šest realnih scenarija koji uključuju scenu bez objekta, kao i različite pozicije objekata u sceni, a u cilju ispitivanja robustnosti razvijenog algoritma [198]. Ovom grupom scenarija je simulirano proizvoljno kretanje objekta po železničkog infrastrukturi, odnosno koloseku i van njega. Za sve scenarije, postupak detekcije je vršen prema blok dijagramu prikazanom na slici 3.54. Ovde će biti prikazani samo rezultati određivanja regiona od interesa i fuzija slika.

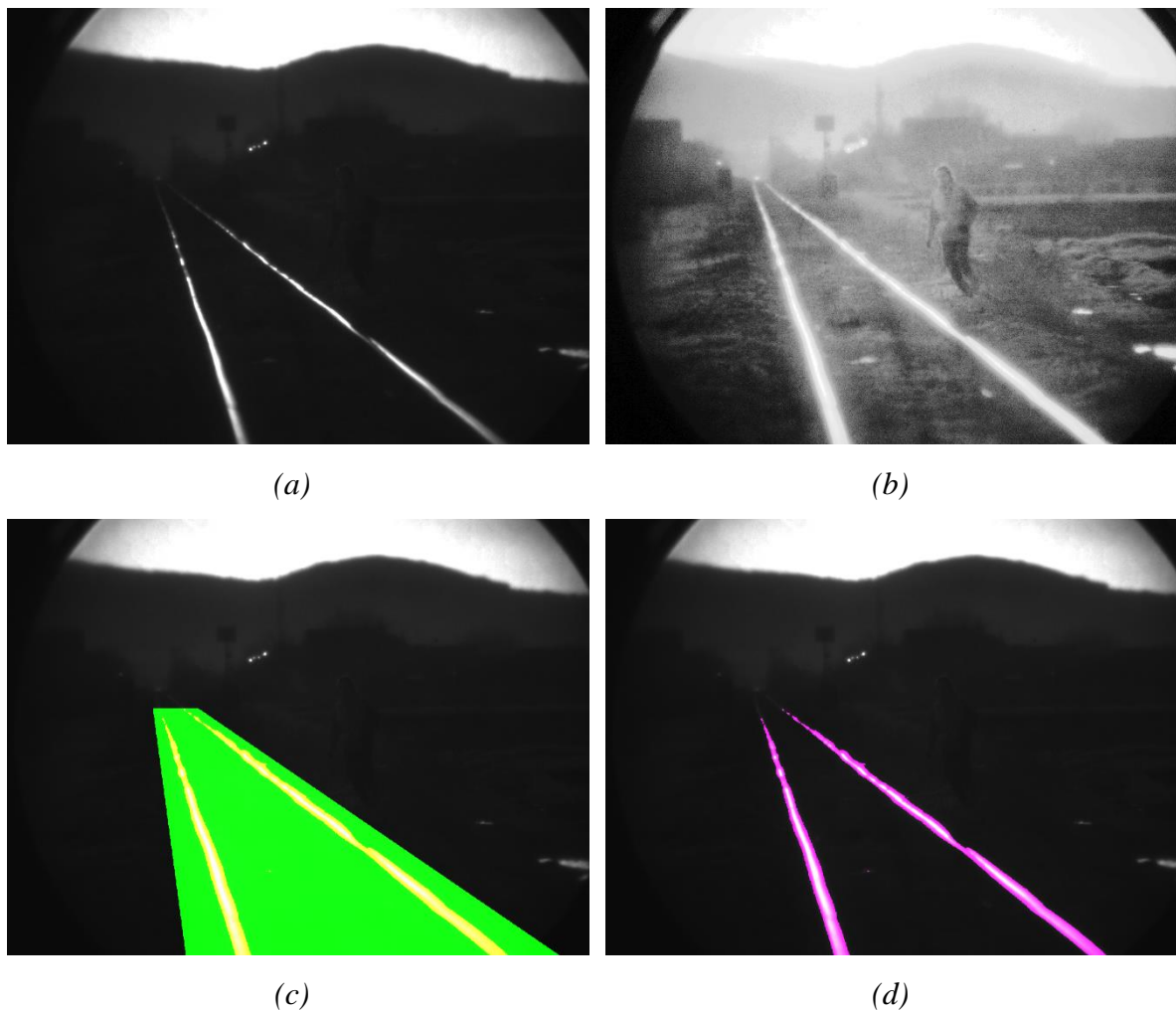
Prvi scenario u ovoj grupi jeste scena bez objekata (Slika 3.60 (a)), tako da je očekivano da algoritam detektuje samo kolosek, što je rezultat detekcije prikazan na slici 3.60 (d) i potvrdio. U drugom scenariju (Slika 3.61 (a)), objekat se nalazio sa unutrašnje strane desne šine, tako da je svakako bio u regionu od interesa. Rezultat detekcije (Slika 3.61 (d)) prikazuje detektovan kolosek označen roze bojom, kao i detektovan objekat, odnosno deo objekta koji se nalazio u regionu od interesa, stoga je i samo taj deo detektovan i označen zelenom bojom. U trećem scenariju, objekat se nalazio sa spoljašnje strane desne šine (Slika 3.62 (a)). Rezultati su pokazali da objekat nije detektovan, što je bilo i očekivano, s obzirom da je bio van regiona od interesa (Slika 3.62 (d)).



**Slika 3.60** Scenario bez objekata: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od intetesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

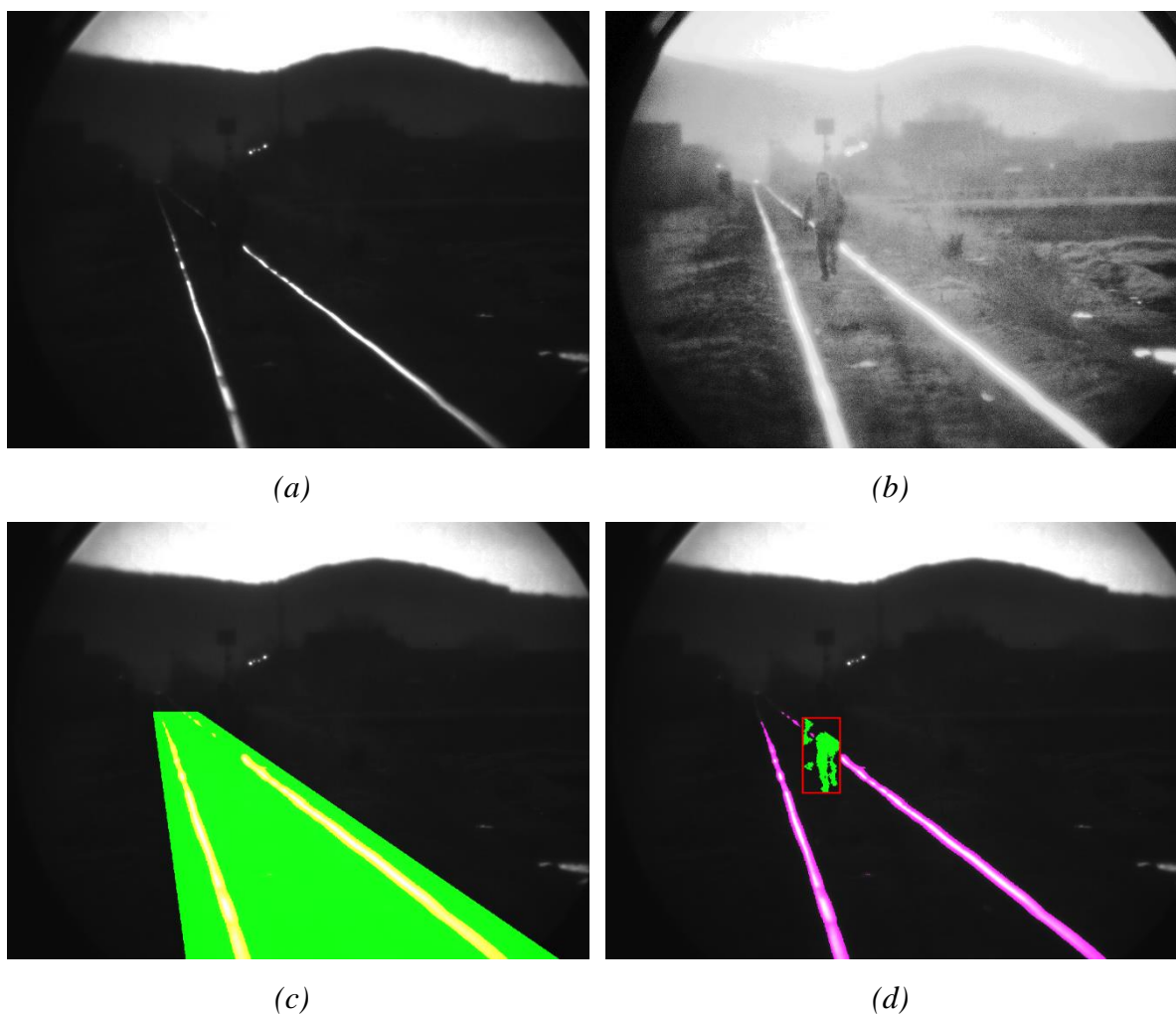


**Slika 3.61** Scenario sa objektom sa unutrašnje strane desne šine: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

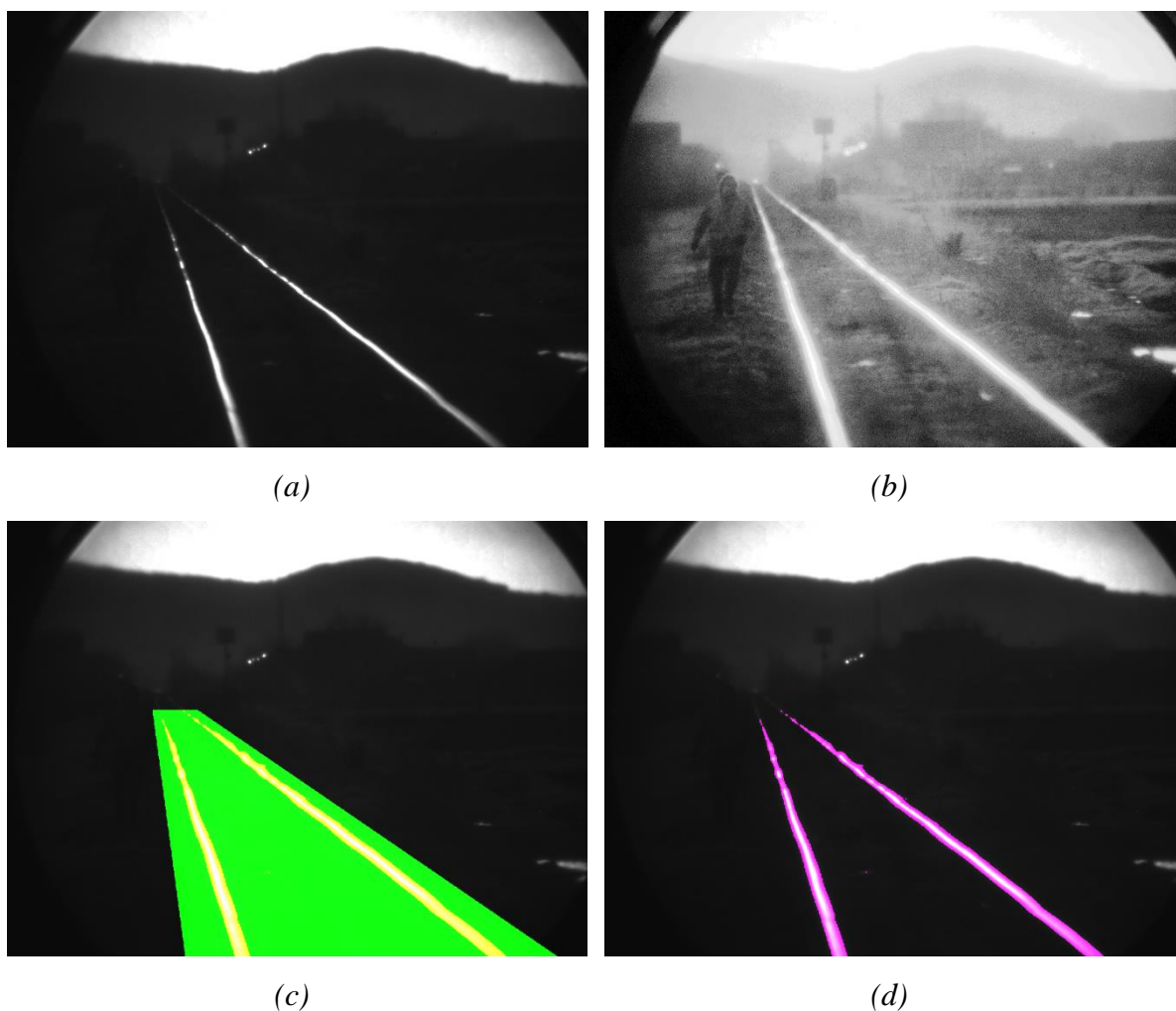


*Slika 3.62 Scenario sa objektom sa spoljašnje strane desne šine: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)*

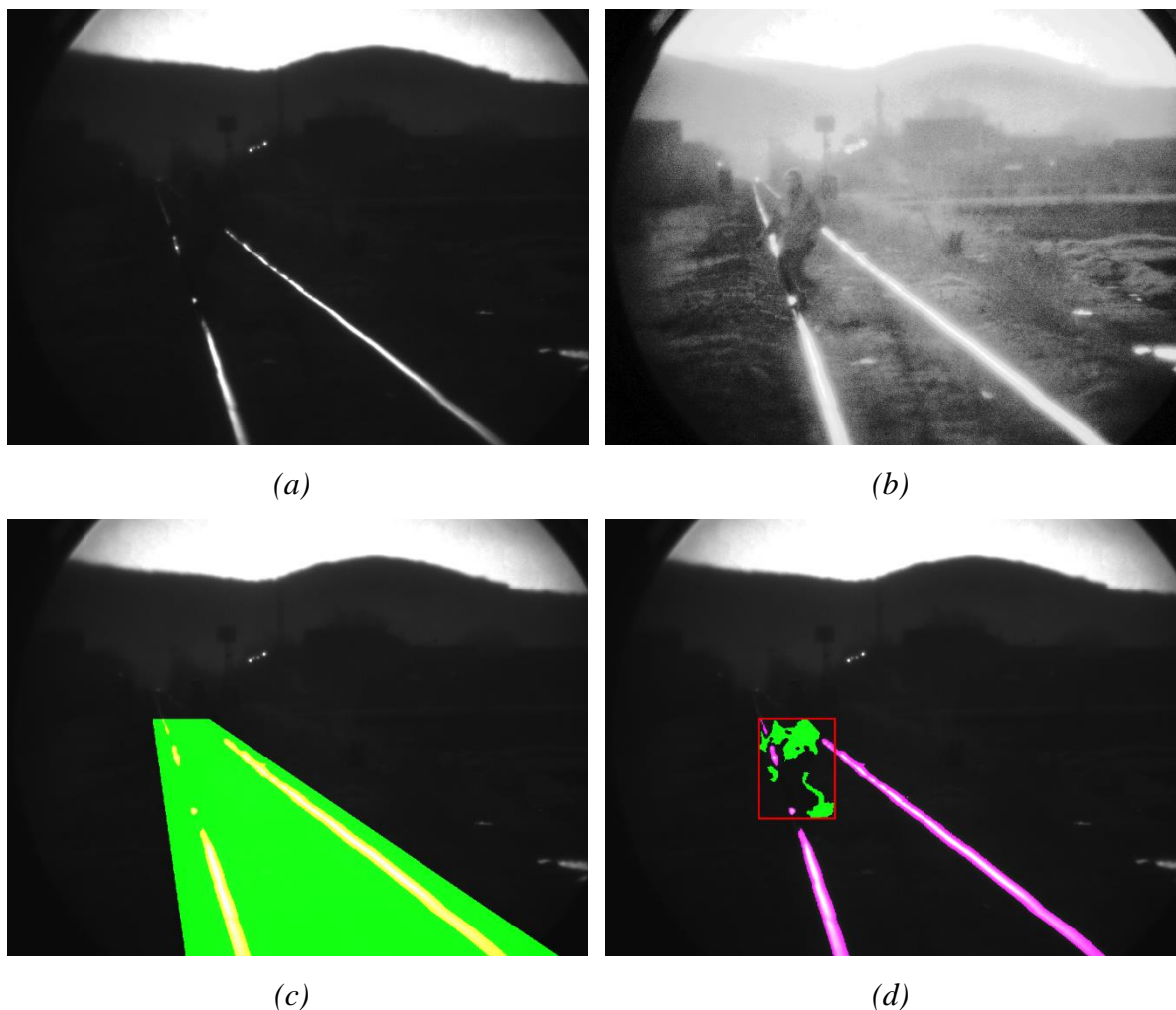
Sledeći, četvrti scenario je obuhvatao poziciju objekta na koloseku, između šina (Slika 3.63 (a)). Iako objekat nije bio na samoj šini, njegovo prisustvo je uzrokovalo pojavu prekida na detektovanom koloseku, što svakako može ukazati na potencijalno prisustvo istog. Objekat, odnosno njegov deo koji se nalazio u ROI, je uspešno i ispravno detektovan (Slika 3.63 (d)). U petom scenariju, objekat se nalazio sa spoljašnje strane leve šine (Slika 3.64 (a)), međutim van regiona od interesa, tako da ga algoritam nije detektovao, što je i prikazano na slici 3.64 (d). Poslednji u ovoj grupi, šesti scenario, je obuhvatao objekat na levoj šini (Slika 3.65 (a)), kako bi se proverila robustnost algoritma i u ovom slučaju. S obzirom da se objekat nalazio u regionu od interesa, uspešno i ispravno je detektovan (Slika 3.65 (d)). Iako zbog varijacija u nivou intenziteta piksela koji pripadaju objektu postoje delovi koji nisu detektovani, može se reći da su rezultati zadovoljavajući.



**Slika 3.63** Scenario sa objektom na koloseku između šina: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

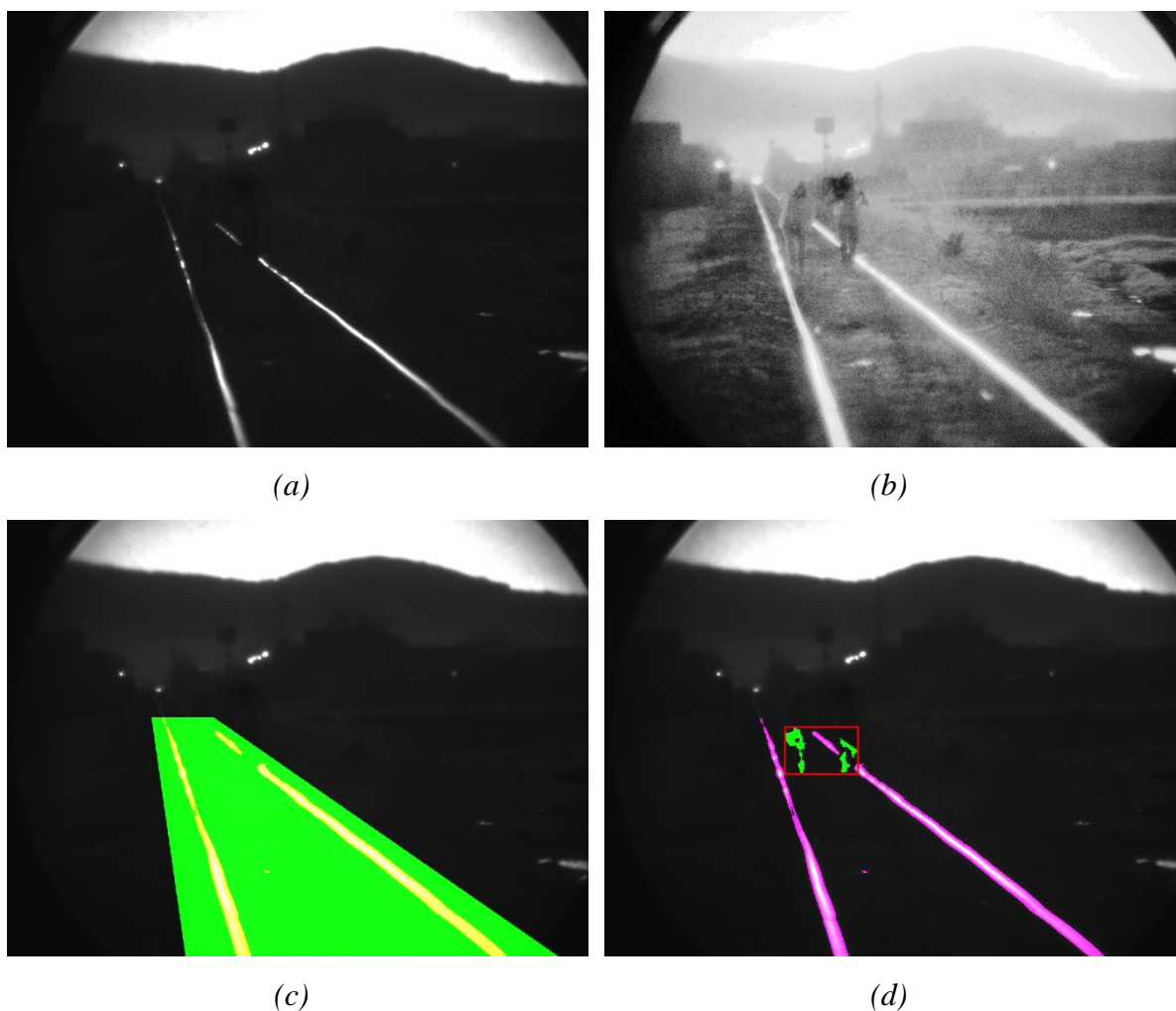


**Slika 3.64** Scenario sa objektom sa spoljašnje strane leve šine: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)



*Slika 3.65* Scenario sa objektom na levoj šini: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

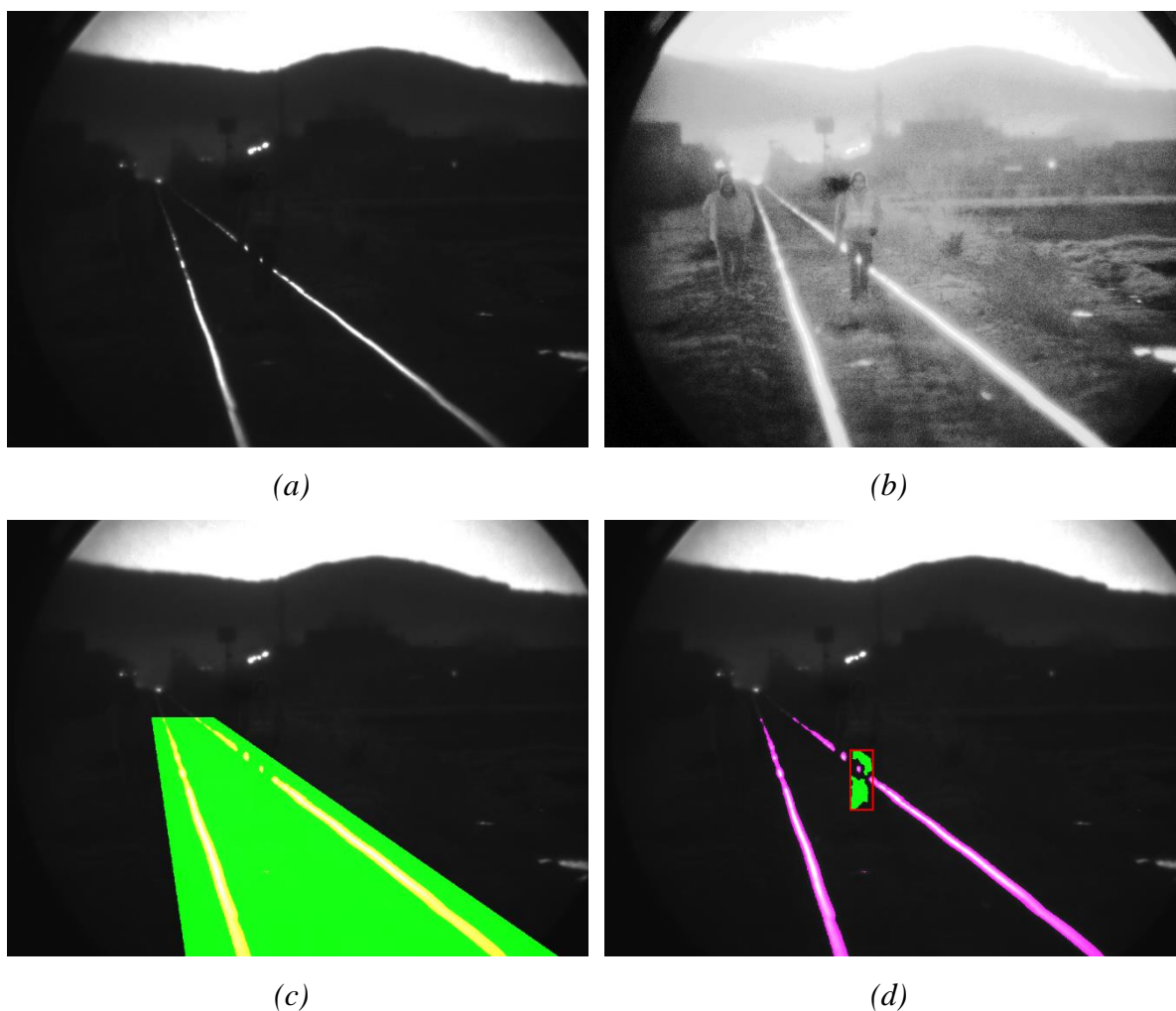
Treća grupa scenarija je osmišljena sa ciljem ispitivanja robustnosti razvijenog algoritma, kada se u sceni nalaze dva objekta-čoveka, koji se proizvoljno kreću. Na taj način je scena usložnjena dok, sa druge strane, predstavlja mogući realni scenario na železničkoj infrastrukturi. Prvi scenario u ovoj grupi obuhvata prisustvo dva objekta na koloseku, odnosno između šina (Slika 3.66 (a)). Objekti se nalaze na rastojanju od 100 metara od sistema noćne vizije. Kao i u prethodnim scenarijima, izvršena je ekvilizacija histograma radi poboljšanja kontrasta (Slika 3.66 (b)). Nakon toga, detekcija koloseka je izvršena kako bi se odredio region od interesa (obeležen zelenom bojom na slici 3.66 (c)) a zatim i detekcija objekata. Rezultati detekcije su prikazani na slici 3.66 (d), i pokazuju da je detekcija objekata, odnosno njihovih delova u regionu od interesa, delimična ali zadovoljavajuća.



**Slika 3.66** Scenario sa objektima na koloseku između šina: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

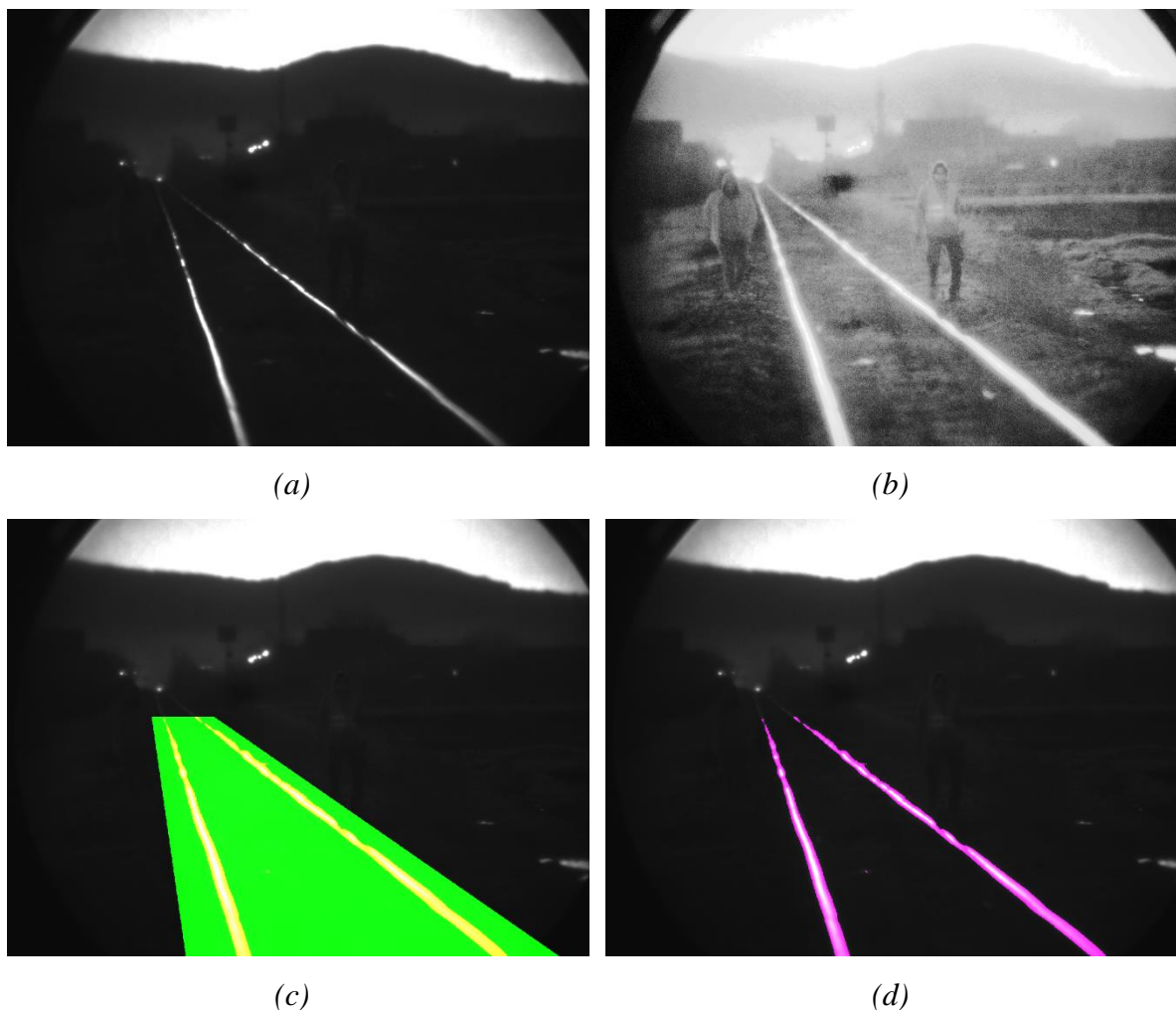
Sledećim scenariom je predviđeno da se jedan objekat nalazi na koloseku, dok se drugi nalazi van koloseka, odnosno sa spoljašnje strane levog koloseka, oba na nepoznatom rastojanju od sistema noćne vizije (Slika 3.67 (a)). Detekcija koloseka i objekata je izvršena kao i u prethodnih scenarijima. Međutim, ovde je detektovan samo deo jednog objekta (Slika 3.67 (d)). To je sasvim razumljivo jer se drugi objekat nalazio van regiona od interesa, stoga ga algoritam nije detektovao tako da, zbog svoje pozicije u sceni, ne predstavlja potencijalnu prepreku.





**Slika 3.67** Scenario sa objektima na i van koloseka: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

U trećem scenariju u ovoj grupi, oba objekta su bila van koloseka, odnosno, sa spoljašnje strane leve i desne šine (Slika 3.68 (a)), oba na nepoznatom rastojanju od sistema noćne vizije. Nakon detekcije pruge i određivanja regiona, izvršena je, prema ranije prikazanom algoritmu i korišćenjem prethodno opisanih metoda, detekcija objekata. Međutim, kako objekti nisu bili u regionu od interesa, nisu bili ni detektovani (Slika 3.68 (d)). To znači da objekti, iako se nalaze u sceni, ne predstavljaju potencijalne prepreke.



*Slika 3.68* Scenario sa objektima van koloseka: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d)

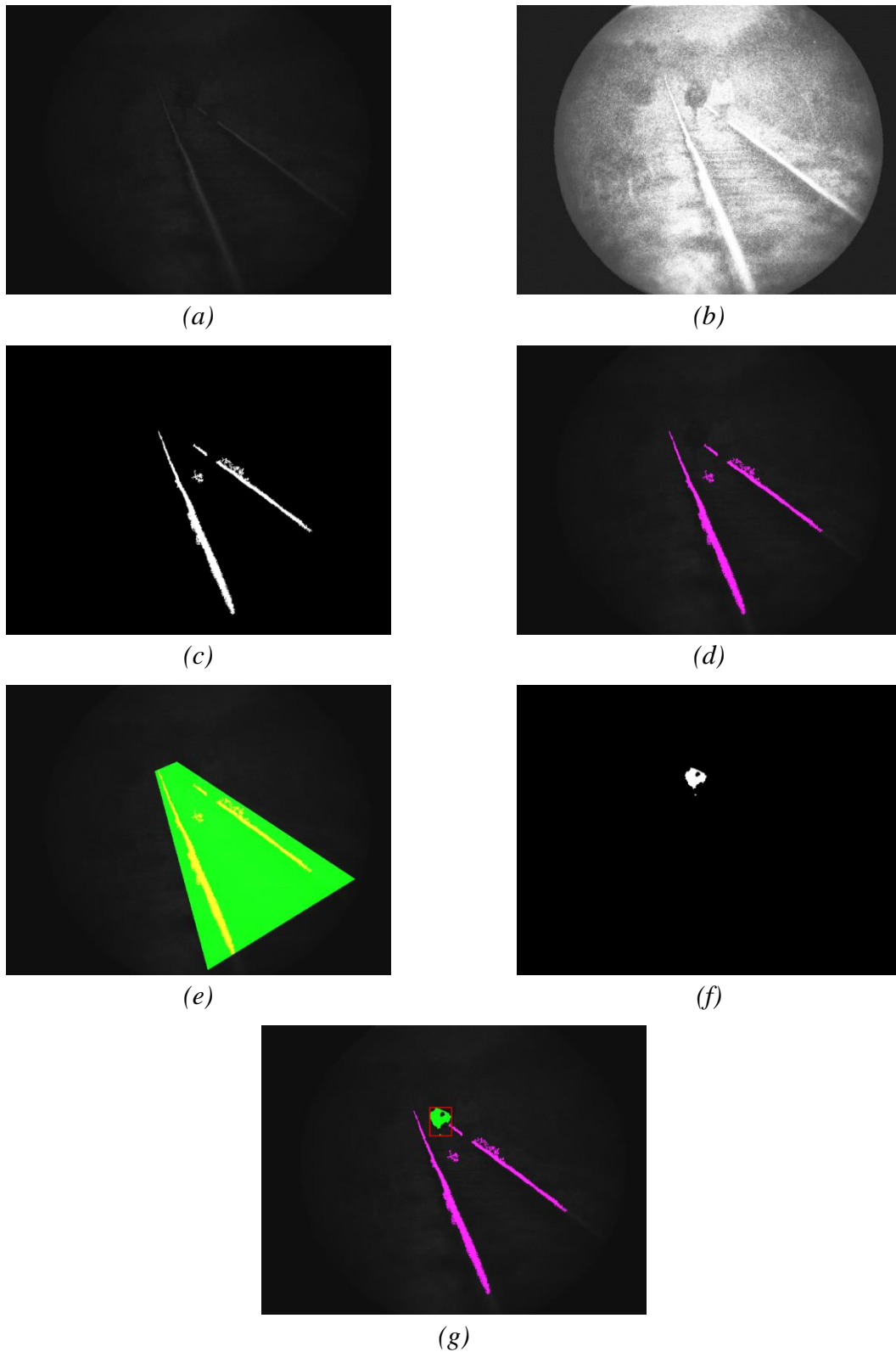
Analizom rezultata prikazanih scenarija, može se zaključiti da je razvijeni algoritam pokazao zadovoljavajuću robustnost u različitim scenarijima na lokaciji Žitorada u kojima je trebalo detektovati potencijalnu prepreku na koloseku. Takođe, može se uvideti da su detektovani delovi objekata koji su se nalazili u regionu od interesa, što je posledica položaja kamere u celokupnom sistemu. Ipak, u slučajevima kada je objekat bio na većim rastojanjima od sistema, detekcija objekata nije bila zadovoljavajuća. Razlog je što je došlo do „stapanja” objekta sa okolinom, odnosno nivoi intenziteta piksela koji pripadaju objektu su bili približno isti onima koji pripadaju okolini, tako da nije postojao odgovarajući kontrast koji bi omogućio ispravan rad algoritma. Glavni uzrok jeste, pre svega, kvalitet snimljene slike, jer je to osnovni uslov za kvalitetnu i tačnu detekciju. Kako kvalitet slike zavisi od karakteristika kamere

sistema noćne vizije, ali i od količine svetlosti u okruženju, može se zaključiti da, u napred navedenim uslovima, nije bilo dovoljno svetlosti u okolini.

Međutim, za potrebe ispitivanja rada sistema noćne vizije i razvijenog algoritma, celokupan sistem je, u okviru projekta SMART, testiran na drugoj lokaciji, u noćnim uslovima, ali u sasvim drugačijim vremenskim uslovima. Sa tim ciljem su novembra 2018. godine vršeni eksperimenti na lokaciji Babin Potok, koja je opisana i prikazana u poglavlju 3.1.1 ove doktorske disertacije. Ova lokacija se nalazi u ruralnoj sredini, i to u nenaseljenom delu, putni prelaz nije osvetljen, a tek na rastojanju od oko 1500 metara od putnog prelaza, duž koloseka, postoji izvor veštačkog osvetljenja, što svakako nema uticaja na rad sistema noćne vizije. Ova lokacija je izabrana zbog uslova okruženja i bezbednosnih aspekata realizacije eksperimenata.

Iako temperatura okoline ne utiče na rad sistema noćne vizije, kao što je to slučaj kod termovizijske kamere, eksperimenti su vršeni novembra 2018. godine u uslovima kada je na i u okolini koloseka bio snežni pokrivač (Slika 3.29), pri temperaturi od 1°C i količini osvetljenja od 0 luksa. Prisustvo magle je značajno uticalo na smanjenu vidljivost na lokaciji (Slika 3.30). Međutim, upravo ovakvi uslovi predstavljaju realan scenario na terenu, pa su i u ovom slučaju korišćeni izvori osvetljenja, koji odgovaraju uređaju za osvetljavanje kod železničkih vozila. Sistem noćne vizije je poboljšán od strane kompanije HD Sova. Pozicija sistema na putnom prelazu je bila ista kao i u prethodnim eksperimentima na lokaciji Žitorada.

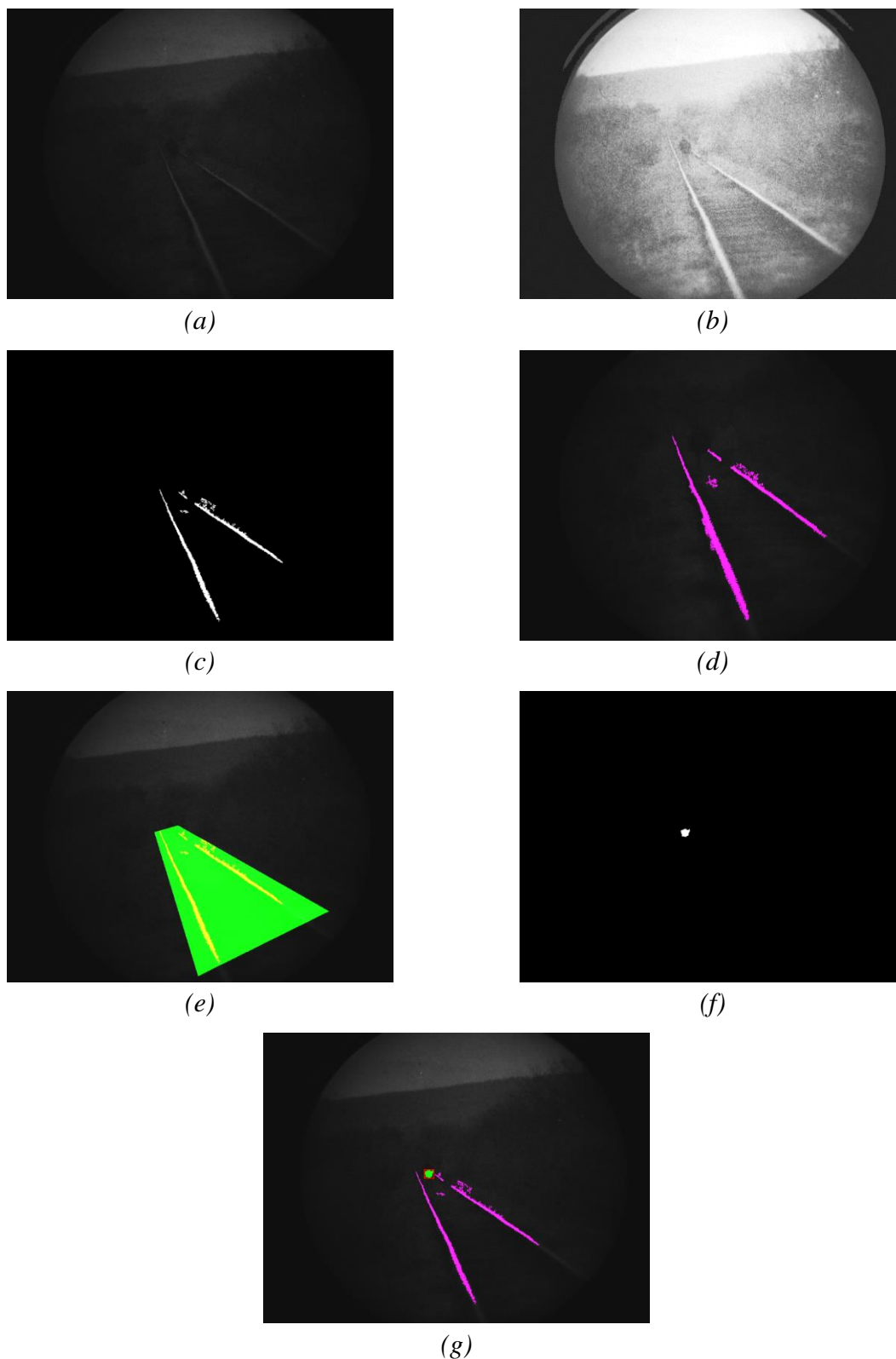
Cilj ovog eksperimenta je bio ispitivanje rada unapređenog sistema noćne vizije na lokaciji gde nema osvetljenja iz okoline, a posebno u lošim vremenskim uslovima. Ovim eksperimentom su predviđena dva scenarija. U prvom scenariju, dva objekta se nalaze na koloseku, između šina (Slika 3.69 (a)). Objekti su zapravo ljudi, odnosno članovi SMART projektnog tima, koji se nalaze na rastojanju od 100 metara, mereno od sistema noćne vizije, odnosno putnog prelaza. I u ovom slučaju, razvijeni algoritam je obuhvatao i izvršenje ekvilizacije histograma, kako bi se poboljšao kvalitet ulazne slike (Slika 3.69 (b)). Nakon toga, izvršena je detekcija koloseka (Slika 3.69 (c)). Rezultati detekcije koloseka prikazuju dva prekida, koji mogu ukazivati na postojanje objekata. Iako se može uočiti manji šum, to nije uticalo na određivanje regiona od interesa prema izrazima (31) i (32) (Slika 3.69 (e)).



**Slika 3.69** Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – objekti na rastojanju od 100 m: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g)

Nakon toga, u regionu od interesa na delu scene, izvršena je detekcija objekata metodom segmentacije zasnovane na regionu, a rezultat je prikazan na slici 3.69 (f), dok su rezultati detekcije nakon fuzije slika prikazani na slici 3.69 (g). Može se primetiti da je detektovan samo deo jednog objekta, i to zato što se taj deo našao u određenom ROI-u, stoga predstavlja potencijalnu prepreku. Drugi objekat nije detektovan zato što postoji značajna razlika između vrednosti nivoa intenziteta piksela dva objekta, a vrednosti nivoa intenziteta piksela, koji pripadaju objektu i okolini, jesu veoma približne. Tome su svakako doprineli i vremenski uslovi, odnosno čestice aerosoli u vazduhu, koje su uticale na pojavu relativno velikog šuma u originalnoj slici, pa je to dovelo do značajnog smanjenja kvaliteta iste. Međutim, iako drugi objekat nije detektovan, svakako postoji prekid u detektovanom koloseku, koji može ukazati na potencijalno prisustvo objekta.

U drugom scenariju, dva objekta su bila na rastojanju od 150 metara, mereno od sistema noćne vizije. Objekti, članovi SMART projektnog tima, su se nalazili na koloseku, između šina. Postupak detekcije je urađen korišćenjem razvijenog algoritma, rezultati detekcije su prikazani na slici 3.70. Kao i u prethodnom scenariju, postoji manji šum u detekciji koloseka, dok je samo deo jednog objekta detektovan i označen kao potencijalna prepreka. Uzrok tome je isti kao i u prethodnom scenariju, pri čemu se ovde još izraženije može videti „stapanje” drugog objekta sa okolinom što, praktično, detekciju istog čini izuzetno teškom, odnosno, u ovom slučaju nemogućom. Može se čak primetiti da i ljudsko oko u većem delu ne može uočiti razliku između objekta i okoline. Ipak, na detektovanoj pruzi postoji prekid na delu gde postoji objekat koji nije detektovan, stoga to može ukazati na potencijalno prisustvo nekog objekta u regionu od interesa.



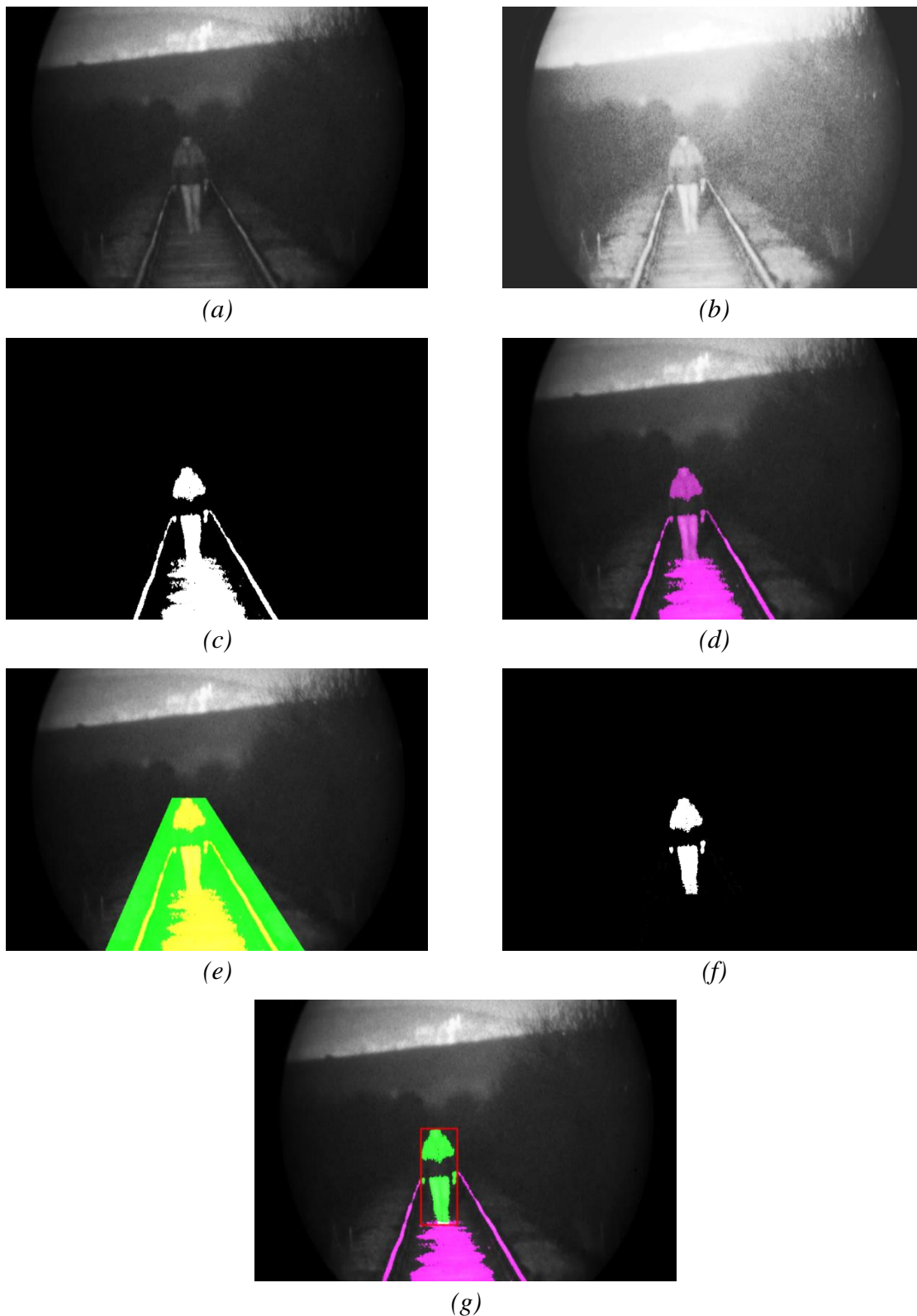
**Slika 3.70** Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – objekti na rastojanju od 150 m: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g)

U cilju ispitivanja robustnosti algoritma, marta 2019. godine je izvršen eksperiment na istoj lokaciji, u okviru projekta SMART, ali pri drugačijim vremenskim uslovima. Naravno, eksperiment je realizovan u noćnim uslovima, ali pri vedrom vremenu, temperaturi od 18°C i izmerenoj količini svetlosti od 0 luksa. Kao i u prethodnim eksperimentima, korišćeni su odgovarajući izvori osvetljenja, a sistem noćne vizije je bio postavljen na visini od 1,5 metara od tla, pri čemu je pozicija kamere bila takva da je njena optička osa bila paralelna sa kolosekom. Eksperimentom je predviđen set od tri realna scenarija u kojima su objekti-članovi SMART tima zauzimali različite pozicije na koloseku, i to na različitim nepoznatim rastojanjima od sistema.

Prvi scenario je obuhvatao prisustvo jednog objekta na koloseku, između šina (Slika 3.71 (a)). S obzirom na to da je na slici neujednačen kontrast, izvršena je ekvilizacija histograma (Slika 3.71 (b)), a zatim detektovana i lokalizovana pruga (Slika 3.71 (d)). Može se primetiti da je postoji prekid u detektovanom koloseku, iako se objekat ne nalazi na samoj šini. Pored toga, detektovan je i deo objekta u sceni, što je doprinelo tome da se i taj deo uključi u određivanje regiona od interesa, kako bi se izvršila tačnija detekciji objekta u sledećem koraku. Nakon detekcije objekta i fuzije, dobijena je slika prikazana na slici 3.71 (g), pa se može zaključiti da objekat predstavlja potencijalnu prepreku jer se nalazi u regionu od interesa.

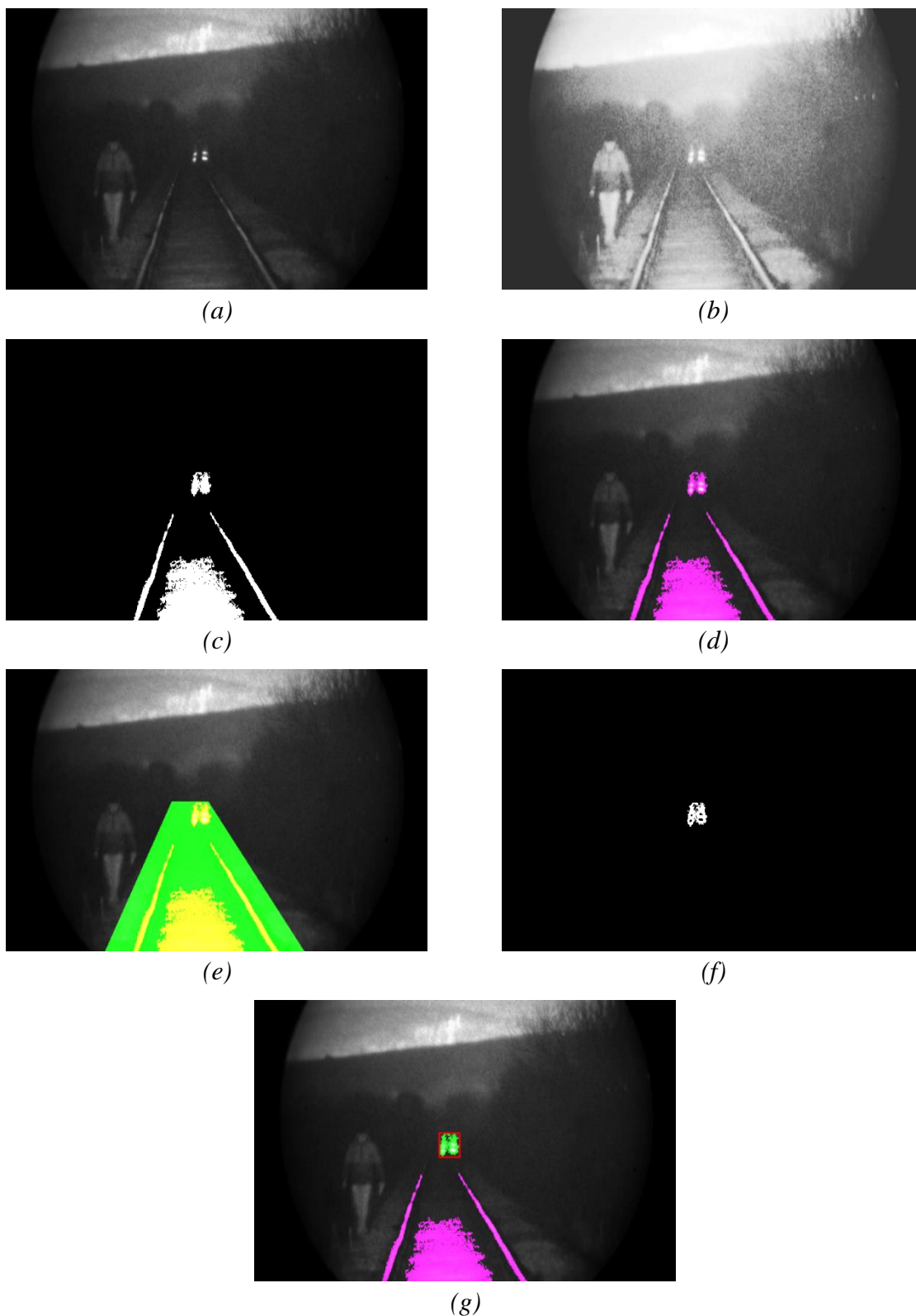
U drugom scenariju, dva objekta-čoveka su se nalazila u sceni na nepoznatim rastojanjima od sistema noćne vizije (Slika 3.72 (a)). Jedan objekat je bio van koloseka, dok je drugi objekat bio na koloseku, odnosno stajao na desnoj šini. Rezultati detekcije su zadovoljavajući jer je algoritam detektovao samo jedan objekat (Slika 3.72 (g)), dok je drugi objekat bio van određenog regiona od interesa, pa stoga nije ni detektovan niti označen kao potencijalna prepreka.

Trećim scenarijom je bilo predviđeno prisustvo jednog objekta u sceni na nepoznatoj udaljenosti od sistema, pri čemu je bilo potrebno da taj objekat bude dodatno osvetljen (Slika 3.73 (a)). Na taj način je kreiran scenario u kome se, na primer, čovek sa lampom nalazi na koloseku, ali u noćnim uslovima, što ima za posledicu pojavu lokalnih naglih promena nivoa intenziteta piksela. Međutim, rezultati detekcije su pokazali da je razvijeni algoritam robustan i u ovom scenariju (Slika 3.73 (g)). Iako nije detektovan samo objekat, već i deo okolne svetlosti, s obzirom na kompleksnost čitavog scenarija, algoritam je dao zadovoljavajuće rezultate detekcije.

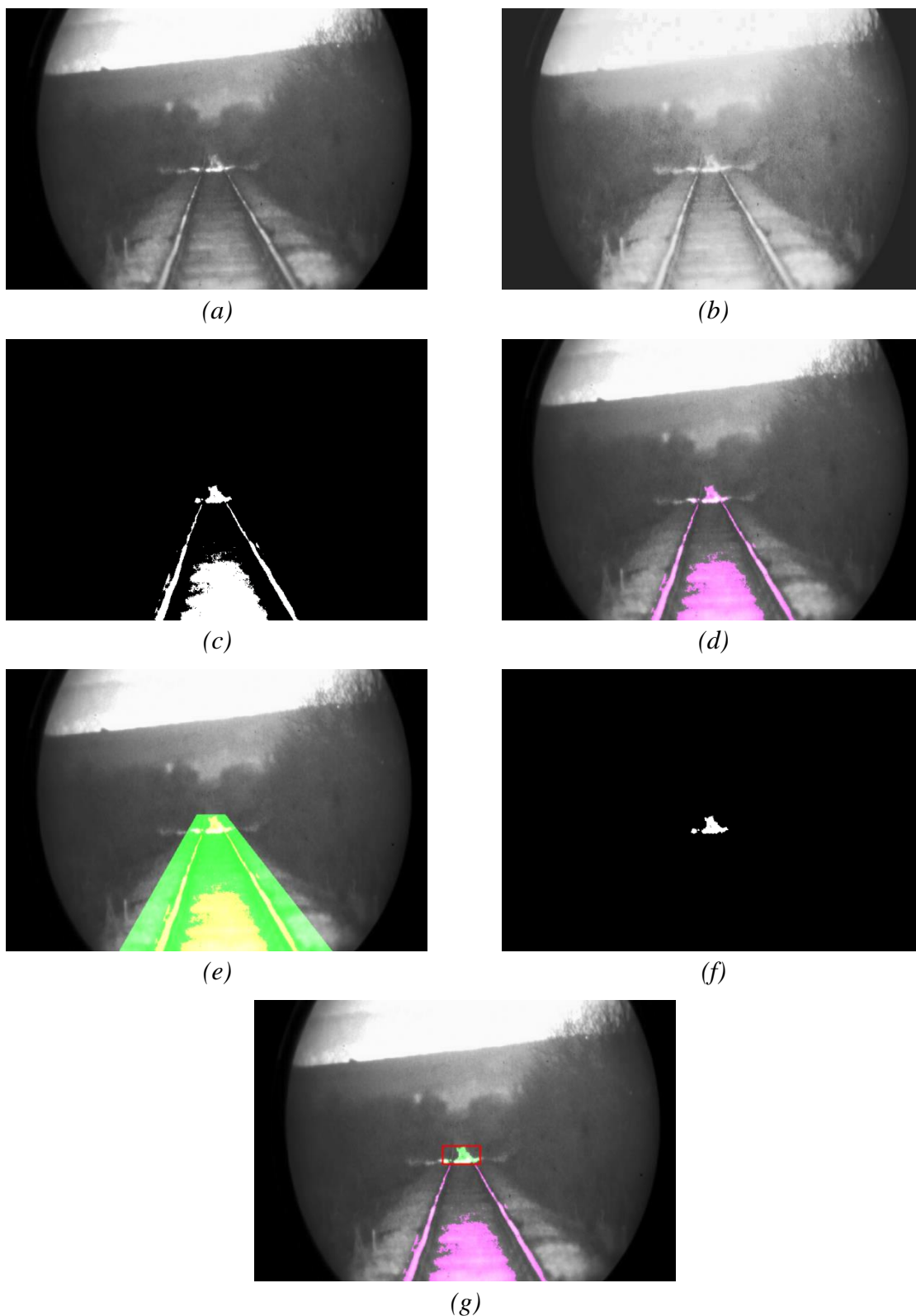


*Slika 3.71* Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – prvi scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g)





*Slika 3.72* Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – drugi scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g)



*Slika 3.73 Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – treći scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g)*



Na osnovu rezultata istraživanja, može se zaključiti da se sistem noćne vizije može koristiti kao deo sistema mašinske vizije za detekciju potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture, i to u noćnim uslovima. Razvijeni algoritam je testiran u 16 realnih scenarija na dve lokacije u različitim vremenskim uslovima i uslovima osvetljenja, kao i u dve različite pozicije sistema. Pokazalo se da nije moguće detektovati objekte na velikim rastojanjima, zbog veoma niskog kvaliteta ulazne slike, a koja zavisi od karakteristika sistema noćne vizije i uslova osvetljenja. Međutim, na manjim rastojanjima objekta od sistema, rezultati detekcije su zadovoljavajući. Ipak, kvalitet detekcije, pored prethodno navedenih razloga, zavisi i od pozicije kamere, jer su u nekim scenarijima detektovani samo delovi objekta koji su bili u regionu od interesa. Sa druge strane, to pokazuje osobinu algoritma da ne detektuje sve objekte u sceni, već samo objekte koji se nalaze u navedenom regionu, jer predstavljaju potencijalnu prepreku bezbednom odvijanju železničkog saobraćaja.

## 4. Inteligentni algoritmi za segmentaciju slike

Ispravna detekcija koloseka predstavlja ključni element u procesu detekcije potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture. Od ispravnosti i kvaliteta detekcije koloseka zavisi određivanje regiona od interesa. S obzirom da nije svaki objekat, koji se nalazi u sceni, potencijalna prepreka bezbednom odvijanju železničkog saobraćaja, već samo onaj koji se nalazi u regionu od interesa, jasno je da neispravna detekcija koloseka može dovesti do netačne detekcije objekta u ROI, ili čak do potpunog izostanka iste, a time i do potencijalno opasne situacije na delu železničke infrastrukture.

Međutim, korišćenje Canny detektora ivica za detekciju koloseka na termovizijskim slikama zahteva podešavanje vrednosti visokog i niskog praga. Ipak, te vrednosti mogu biti različite za svaku sliku, tako da tradicionalni Canny detektor ivica ne može izvršiti adaptivno podešavanje vrednosti. Ručno određivanje vrednosti optimalnog praga može biti dugačak i težak proces posebno za termovizijske slike, jer je njihov obično nizak kvalitet uzrokovan performansama termovizijske kamere, ali i uslovima u kojima je snimljena sama slika. Stoga, korišćenje Canny detektora sa optimalnim vrednostima praga utiče na tačnost i kvalitet detekcije koloseka, a njegova adaptibilnost omogućava robustnost i široku primenu.

Različiti principi i tehnike su korišćeni kako bi se odredila jedna ili obe vrednosti praga Canny detektora ivica. Tako je u [219] predstavljen poboljšani metod za određivanje vrednosti praga na osnovu histograma. Ovaj metod je dao dobre rezultate, ali može izazvati pojavu lažnih ivica. U radu [217], Otsu algoritam je korišćen kako bi se odredila vrednost visokog praga, dok je vrednost niskog praga dobijena množenjem vrednosti visokog praga sa koeficijentom 0,5. Pored toga što se ova metoda pokazala kao efikasna za ekstrahovanje ivica, usvojene dve vrednosti praga su dve globalne vrednosti, koje se dobijaju na osnovu celokupne slike. Sa druge strane, autori su prikazali u radu [155], izračunavanje niske vrednosti praga na osnovu modela verovatnoće, dok je Otsu metod korišćen za određivanje visoke vrednosti praga, a metoda adaptivne optimizacije rojem čestica (engl. *Particle Swarm Optimization (APSO)*) je korišćena za dobijanje optimalnih vrednosti praga. U [220] je predstavljen adaptivni odabir vrednosti praga korišćenjem adaptivne funkcije mapiranja u kombinaciji sa algoritmom identifikacije

oblika, sa ciljem segmentacije oblasti slike u kojoj se nalazi list. Kombinacija metode maksimalne entropije sa Otsu metodom za određivanje visoke i niske vrednosti praga Canny algoritma, prikazana je u [156]. Rezultati su pokazali da predloženi algoritam ima bolje performanse za slike koje imaju složene distribucije histograma nivoa sive boje. Sa druge strane, autori su u [221] predstavili metod zasnovan na Otsu algoritmu i matematičkoj morfologiji. Ova metoda vrši odabir vrednosti praga adaptivno i simultano, primenjuje poboljšani Canny operator i morfologiju slike odvojeno za detekciju ivica slike, a zatim vrši fuziju dva rezultata koristeći tehnologiju fuzije talasa da bi se dobila konačna slika detektovanih ivica. Predloženi algoritam u [222] koristi lokalne vrednosti praga za detekciju čestica sa slika, izborom koliko podslika se koristi i automatski segmentira celokupnu sliku na potreban broj. Nakon toga se izračunavaju vrednosti lokalnih pragova svake podslike, pomoću Otsu algoritma za visoku vrednost praga ( $T_h$ ), dok se vrednost niskog praga izračunava kao proizvod  $0,4 \cdot T_h$ . Algoritam koji adaptivno može odrediti dve vrednosti praga na osnovu gradijenta histograma i minimalne varijanse interklasa, predstavljen je u [223]. Za potrebe detektovanja krvnih sudova mrežnjače, korišćen je detektor kao lokalni dinamički generator praga vrednosti histerezisa na osnovu Canny detektora [224]. U radu [225], predložena je metoda zasnovana na kombinovanju informacija o gradijentu sa informacijama dobijenim kada se postupak povezivanja primenjuje na sve kandidate, i da se dobiju pragovi histerezisa iz prethodnih spojenih informacija. Sa druge strane, upotreba fazi skupova tipa 2 za prevazilaženje nepouzdanosti algoritama koji automatski biraju vrednosti praga, predstavljena je u [226]. Nenadzirano određivanje vrednosti praga za Canny detektor ivica, zasnovano na dvodimenzionalnoj maksimalnoj uslovnoj entropiji su autori prikazali u [227]. Međutim, određivanje podesivih visokih i niskih vrednosti praga Canny detektora ivica prema intenzitetu gradijenta slike, prikazano je u [228]. Parametri se određuju na osnovu maksimalne unakrsne entropije između klasa i Bajesove teorije rasuđivanja.

U okviru istraživanja predstavljenog u ovoj doktorskoj disertaciji, genetski algoritam (GA) je korišćen za određivanje optimalne vrednosti praga za detekciju koloseka. Genetski algoritam je inspirisan procesom prirodne selekcije, tj. evolucije u prirodnim procesima. Zbog svoje prilagodljivosti i efikasnosti, često se koristi kao alat za optimizaciju, iako je opseg primene GA veoma širok [229]. Implementacija GA započinje nasumično generisanom populacijom jedinki i predstavlja iterativni proces, gde je populacija u svakoj iteraciji nazvana generacijom. Svaki član populacije, odnosno jedinka, opisuje jedno od mogućih rešenja problema, odnosno aproksimaciju rešenja [140]. Hromozomi jesu kodirana predstava jedinki i

mogu biti niz bitova, realan ili prirodan broj ili njihov niz, odnosno struktura podataka koja opisuje svojstva jedinke. Hromozom se sastoji od više gena, a gen je kodirana promenljiva problema koji se rešava [230]. Funkcija cilja, koja predstavlja meru kvaliteta, se određuje za svako rešenje, odnosno pridružuje se svakoj jedinki. Postupkom selekcije se biraju bolje jedinke (one koje imaju bolju ocenu kvaliteta), dok se lošije odbacuju. Nova generacija nastaje ukrštanjem jedinki iz populacije i njihovim mutacijama. Ukrštanjem se prenose svojstva roditelja na potomke, a mutacija stvara novu jedinku menjajući manji deo genetskog materijala [140]. Novoformirana generacija se koristi u sledećoj iteraciji algoritma. Na ovaj način se popravljaju prosečan kvalitet populacije. Postupak kreiranja novih generacija može prestati kada se zadovolji uslov zaustavljanja iterativnog procesa, odnosno kada je nastao određeni broj generacija ili je dostignuta sličnost jedinki u populaciji što ukazuje na to da je algoritam konvergirao [230]. Najbolji član trenutne populacije predstavlja rešenje koje se može usvojiti kao optimalno [140]. Struktura genetskog algoritma je prikazana na slici 4.1.



**Slika 4.1** Struktura genetskog algoritma [140]

Implementacija genetskog algoritma ima sledeće osnovne korake [150, 231, 232]:

1. Početak sa nasumično generisanom populacijom od  $N$  hromozoma, gde  $N$  predstavlja veličinu populacije a  $l$  dužinu hromozoma  $x$ .
2. Proračun funkcije cilja  $f(x)$  za svaki hromozom  $x$  u populaciji.
3. Ponavljanje narednih koraka dok se ne stvori  $N$  potomstvo.
  - a. Odabir para matičnih hromozoma (roditelja) iz trenutne populacije, gde će verovatnoća izbora biti rastuća funkcija cilja. Proces odabira se vrši „sa zamenom”, tako da se isti hromozom može odabrati više puta za roditelja.

- b. Sa verovatnoćom  $p_c$  (verovatnoća ukrštanja ili stopa ukrštanja), ukrštanje para u nasumično izabranoj tački (izabran sa jednakom verovatnoćom) se vrši tako da se formiraju dva potomstva. Ako se ne dogodi nikakvo ukrštanje, formirati dva potomka koji su kopije njihovih roditelja.
- c. Mutacija dva potomstva na svakom nivou sa verovatnoćom  $p_m$  (verovatnoća mutacije ili stopa mutacije) i postavljanje dobijenog hromozoma u novu populaciju. U slučaju da je  $N$  neparno, jedan novi član populacije se može nasumično odbaciti.

4. Zamena trenutne populacije novoformiranom.

5. Vraćanje na korak 2.

Genetski algoritam je široko korišćena metoda za različite aplikacije u oblastima igara, sistema u realnom vremenu, organizacije radnih zadataka, itd. [233, 234]. U oblasti obrade slike, GA se koristi za poboljšanje i segmentaciju slike [231], različite vrste detekcije sa slika, npr. određeni geometrijski oblik [235], i sa različitim slika, npr. medicinske [236], SAR slike [237], itd., kao alat za optimizaciju, u cilju povećanja tačnosti, kvaliteta i brzine detekcije, kao i za odabir karakteristika [140]. Za postizanje željenog poboljšanja slike u boji, autori su koristili genetski algoritam u [238]. Funkcija cilja je formirana i koristila se za određivanje optimalnog skupa generalizovanih vrednosti. Eksperimentalni rezultati pokazali su da su poboljšane slike u boji, dobijene korišćenjem genetskog algoritma, bolje nego one dobijene bilo kojim od tri postojeća pristupa korišćena za poređenje rezultata. Takođe, za rešavanje problema sa poboljšanjem kontrasta slike, metoda zasnovana na genetskom algoritmu predstavljena je u [239], gde se koristi jednostavan i nov prikaz hromozoma zajedno sa odgovarajućim operatorima. Na osnovu eksperimentalnih rezultata, može se videti da je predložena metoda dala dobre rezultate u prirodnom izgledu, posebno kada je dinamički opseg ulazne slike visok. Međutim, genetski algoritam koristi se i u druge svrhe u obradi slike, kao što je segmentacija i odabir karakteristika. Da bi se razvila tehnologija detekcije suvog grožđa zasnovana na mašinskoj viziji, primenjena je nadgledana segmentacija slike u boji korišćenjem genetskog algoritma kodiranog permutacijom [240]. Ova segmentacija je identifikovala oblasti u prostoru HSI (hue–saturation–intensity (HSI)) boja za željenu i neželjenu detekciju suvog grožđa u različitim uslovima osvetljenja. U [241] je predstavljena metoda zasnovana na genetskom algoritmu za razvijanje adaptivnih postupaka za konturnu segmentaciju anatomskih struktura u 3D medicinskim skupovima podataka. Pomoću genetskog algoritma razvijen je detektor 2D kontura anatomske strukture da bi se dobila puna segmentacija strukture. U svrhu

odabira skupa karakteristika za razlikovanje ciljnih od lažnih alarma na SAR slikama, korišćen je genetski algoritam u [242]. Ovaj algoritam pokreće funkcija cilja zasnovana na principu minimalne dužine opisa (engl. *minimum description length principle - MDLP*), a rezultati su pokazali da je predloženi genetski algoritam odabrao dobar niz funkcija da bi efikasno razlikovao ciljne od lažnih alarma. Upotreba genetskog algoritma za izbor karakteristika slike, kao dela klasifikatora, u cilju razlikovanja područja od interesa za mamograme kao određena masa ili normalno tkivo, predstavljena je u [243]. U poređenju sa postupnim odabirom karakteristika, izbor zasnovan na GA je dao bolje rezultate. Ovo dovodi do indikacije da genetski algoritam može pružiti brojne mogućnosti za linearne ili nelinearne klasifikatore.

#### 4.1. Primena genetskog algoritma za određivanje optimalne vrednosti visokog praga Canny detektora ivica

Kvalitet i tačnost detekcije koloseka, u značajnoj meri, zavisi od vrednosti praga Canny detektora ivica. Upravo ta povezanost vodi do toga da se postupak određivanja optimalne vrednosti praga može započeti time što će se greška detekcije minimizovati. Greška detekcije (*error*) je definisana kao odnos broja neispravno i ispravno detektovanih piksela (prikazano u izrazu (33)) [150, 244]. Neispravno detektovani pikseli ( $W_D$ ) su oni pikseli koji ne pripadaju koloseku u sceni, a ispravno detektovani pikseli ( $R_D$ ) su oni koji pripadaju koloseku.

$$error = \frac{W_D}{R_D} \quad (33)$$

Međutim, kako bi se predupredila mogućnost da oba parametra imaju niske vrednosti, a samim tim da i greška detekcije bude mala, dodatni uslov je broj ukupno detektovanih piksela. U slučaju malog broja ukupno detektovanih piksela, vrednost greške je mala, ali dobijena slika nije upotrebljiva za dalju obradu. Minimalna vrednost ukupno detektovanih piksela zavisi od slike, kao i od kvaliteta detektovanih ivica.

Kako bi se odredila optimalna vrednost visokog praga Canny detektora ivica, odnosno ona vrednost za koju će greška detekcije biti minimalna, korišćen je genetski algoritam kako bi se pronašao minimum funkcije cilja. Funkcija cilja ( $y$ ) je funkcija jedne promenljive ( $x$  je vrednost visokog praga) i određena je postupkom fitovanja podataka zavisnosti greške od vrednosti praga, dobijenih u okviru istraživanja. Navedena funkcija je polinom četvrtog reda i data je izrazom [150]:

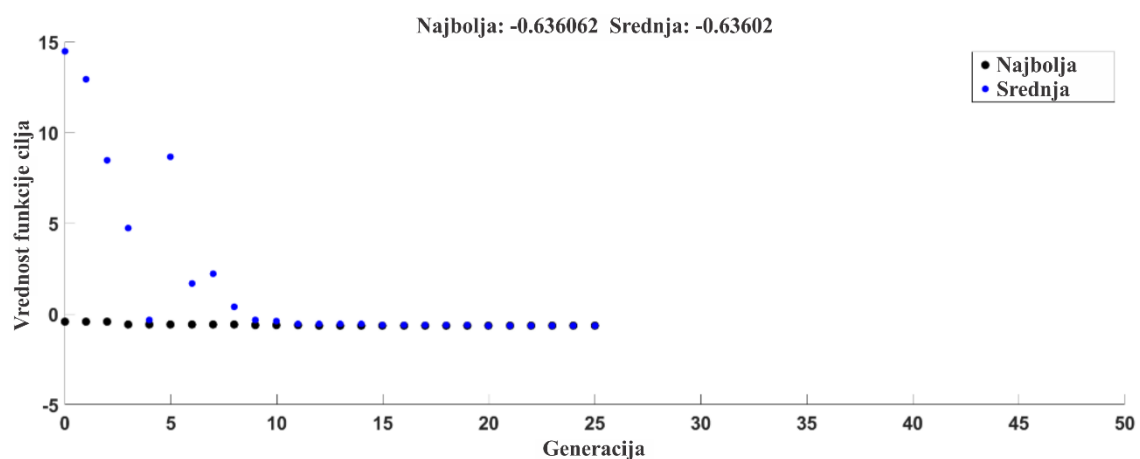
$$y = -0.7714 \cdot 10^3 \cdot x^4 + 1.1422 \cdot 10^3 \cdot x^3 - 0.3584 \cdot 10^3 \cdot x^2 - 0.1071 \cdot 10^3 \cdot x + 0.0480 \cdot 10^3 \quad (34)$$



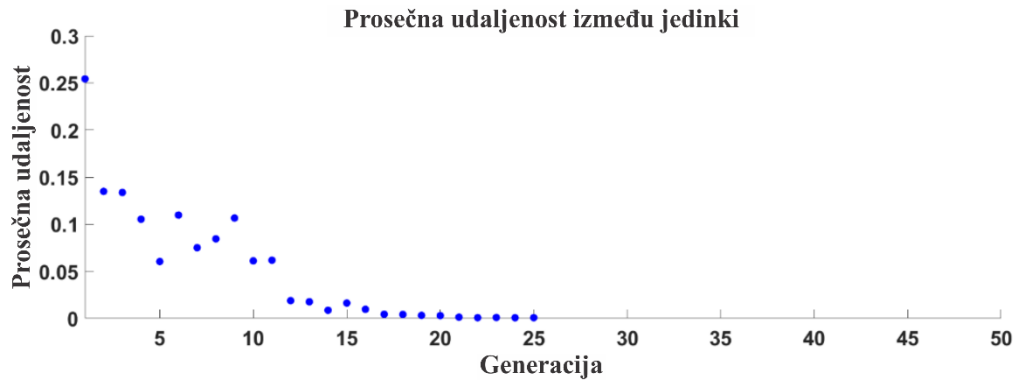
Parametri genetskog algoritma za određivanje optimalne vrednosti visokog praga su prikazani u tabeli 4.1. Najbolja i srednja vrednost funkcije cilja sa izvršenih 25 iteracija su prikazane na slici 4.2, gde se vidi da se vrednosti najbolje jedinice smanjuju, što je i bilo očekivano, jer se vrši optimizacija. Pored toga, i srednja vrednost (prosečna) populacije je smanjena, odnosno u celini, populacija je poboljšana, tako da se dobijaju bolja rešenja za populaciju. Prosečna udaljenost između jedinki je prikazana na slici 4.3, gde se može videti da populacija konvergira, jer se prosečna udaljenost između jedinki (rešenja) u pogledu ciljnih vrednosti smanjuje, kako generacije prolaze, što predstavlja merilo raznolikosti populacije. Algoritmu je bilo potrebno tri sekunde da bi konvergirao nakon 25 iteracija [150].

**Tabela 4.1** Parametri genetskog algoritma za određivanje vrednosti visokog praga [150]

<i>Parametar</i>	<i>Vrednost</i>
Populacija	20
Broj generacija	50
Tolerancija funkcije	1e-6
Broj „stall” generacija (generacija u zaustavljanju)	20

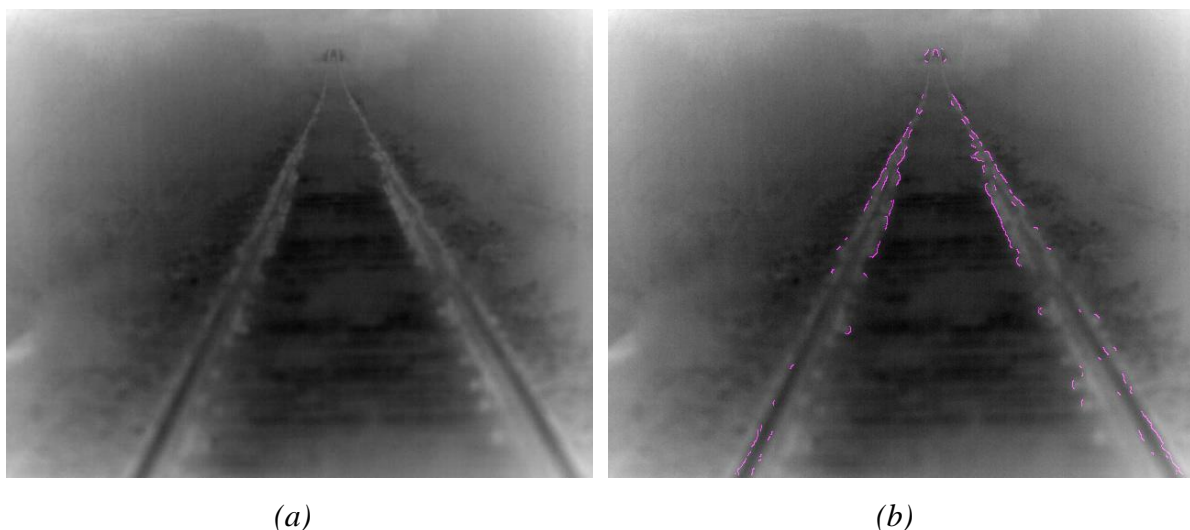


**Slika 4.2** Najbolja i srednja vrednost funkcije cilja – visoka vrednost praga [150]



**Slika 4.3** Prosečna udaljenost između jedinki – visoka vrednost praga [150]

Prikazani metod određivanja optimalne vrednosti visokog praga je testiran na setu termovizijskih slika, snimljenih na terenu u noćnim uslovima, pri izuzetno otežanim uslovima. Jedan od testiranih scenarija je prikazan na slici 4.4 (a). U ovom slučaju, zadatak je bio da se izvrši detekcija koloseka. Primenom genetskog algoritma, određena je optimalna vrednost visokog praga 0,4867, a vrednost niskog praga je izračunata pomoću Otsu metode [217]. Minimalna greška, definisana na gore navedeni način, je 58,5697 [150]. Rezultati detekcije ivica Canny detektorom sa navedenim parametrima su pokazali da su ivice koloseka detekovane (prikazano ljubičastom bojom na slici 4.4 (b)), ali se može primetiti da postoji više prekida. S obzirom da je to moguća posledica određivanja samo vrednosti visokog praga, ukazala se potreba da se genetskim algoritmom odrede obe vrednosti praga.



**Slika 4.4** Primena genetskog algoritma za određivanje vrednosti visokog praga:  
originalna termovizijska slika (a), detektovan kolosek (b) [150]

## 4.2. Primena genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti visokog i niskog praga Canny detektora ivica

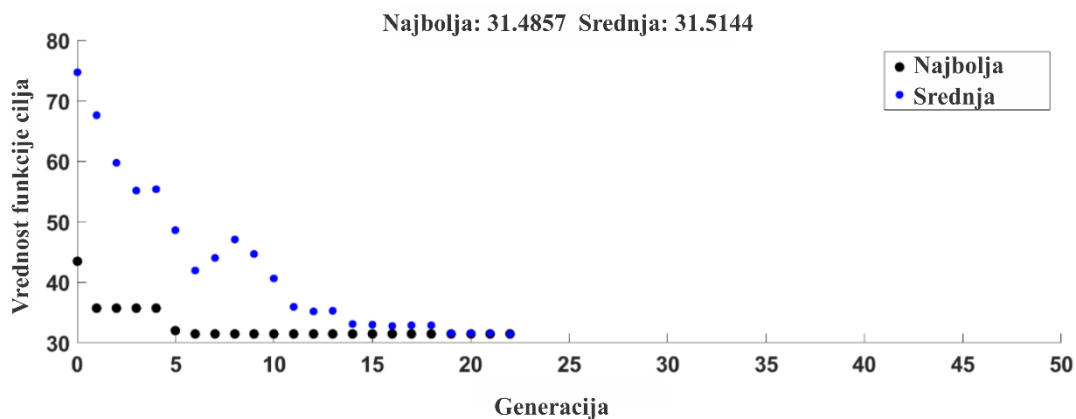
Postupak određivanja optimalnih vrednosti praga Canny detektora ivica je, u slučaju visokog i niskog praga, izvršen tako što je genetski algoritam korišćen za nalaženje minimuma funkcije cilja, odnosno onih vrednosti praga, za koju će greška detekcije, data izrazom (33), biti minimalna. Funkcija cilja ( $z$ ) je funkcija dve promenljive ( $x$  je vrednost niskog praga, a  $y$  je vrednost visokog praga) i određena je postupkom fitovanja podataka zavisnosti greške od vrednosti praga, dobijenih u okviru istraživanja. Navedena funkcija je polinom petog reda i data je izrazom [150]:

$$\begin{aligned} z = & 46.42 + 645.3 \cdot x + 505.6 \cdot y - 4286 \cdot x^2 - 1167 \cdot x \cdot y - 3038 \cdot y^2 + \\ & 8943 \cdot x^3 + 4028 \cdot x^2 \cdot y + 5186 \cdot x \cdot y^2 + 4607 \cdot y^3 - \\ & 6052 \cdot x^4 - 9582 \cdot x^3 \cdot y + 1447 \cdot x^2 \cdot y^2 - 0.0001114 \cdot x \cdot y^3 - \\ & 128.4 \cdot y^4 + 596.5 \cdot x^5 + 6004 \cdot x^4 \cdot y - 448 \cdot x^3 \cdot y^2 - \\ & 480.1 \cdot x^2 \cdot y^3 + 6713 \cdot x \cdot y^4 - 2193 \cdot y^5 \end{aligned} \quad (35)$$

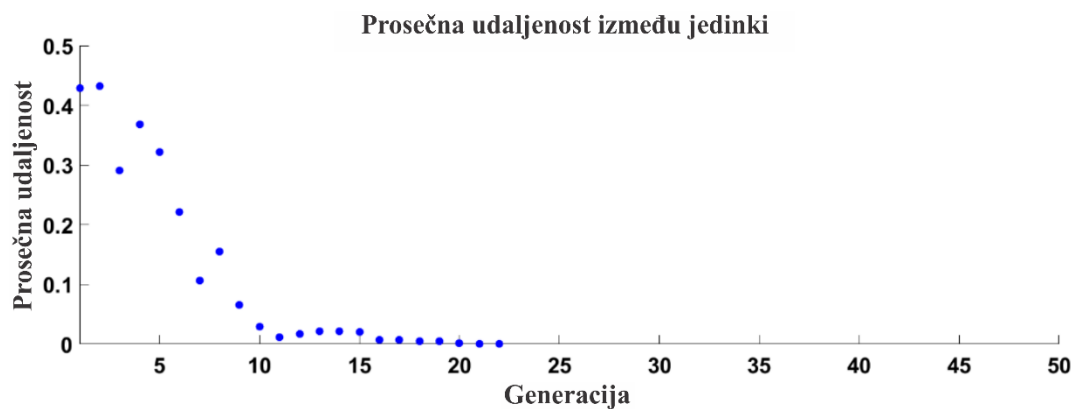
Parametri genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti niskog i visokog praga su prikazani u tabeli 4.2. Najbolja i srednja vrednost funkcije cilja sa izvršene 22 iteracije je prikazana na slici 4.5, a prosečna udaljenost između jedinki je prikazana na slici 4.6. Rezultati su pokazali da se, i u ovom slučaju, vrši optimizacija, jer se vrednosti najbolje jedinke smanjuju, a populacija konvergira. Vreme konvergencije algoritma je 40 sekundi, nakon 22 iteracije [150].

**Tabela 4.2** Parametri genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti niskog i visokog praga [150]

<b>Parametar</b>	<b>Vrednost</b>
Populacija	20
Broj generacija	50
Tolerancija funkcije	1e-6
Broj „stall“ generacija (generacija u zaustavljanju)	20

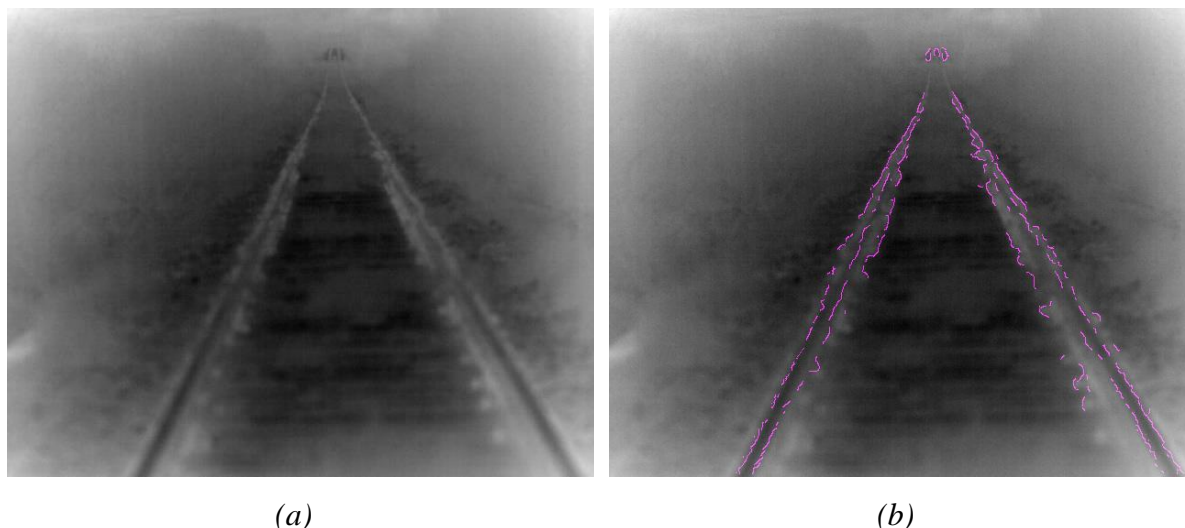


Slika 4.5 Najbolja i srednja vrednost funkcije cilja – obe vrednosti praga [150]



Slika 4.6 Prosečna udaljenost između jedinki – obe vrednosti praga [150]

Optimalne vrednosti praga, određene genetskim algoritmom, su 0,000142814916122408, za nisku vrednost praga i 0,413898286851236, za visoku vrednost praga. Ove vrednosti su korišćene prilikom detekcije koloseka Canny detektorom ivica, i rezultati su prikazani na slici 4.7 (b). Minimalna greška detekcije je 50,4768, koja je svakako manja u poređenju sa prethodnim rezultatima kada je genetskim algoritmom određivana samo visoka vrednost praga. Sa druge strane, kvalitet detekcije je značajno bolji, rezultat detekcije ima manje prekida i više ispravno detektovanih ivica, pa se može koristiti u daljoj obradi slike.



**Slika 4.7** Primena genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti niskog i visokog praga: originalna termovizijska slika (a), detektovan kolosek (b) [150]

Međutim, iako je algoritmu u drugom slučaju bilo potrebno više vremena za konvergenciju, to vreme zavisi i od performansi korišćenog hardvera. Takođe, na kvalitet detekcije utiče i kvalitet termovizijskih slika, a u prikazanom scenariju su slike snimljene u izuzetno otežanim uslovima, što ima za posledicu velike varijacije vrednosti intenziteta piksela koje ograničavaju detektor ivica, stoga nisu detektovane sve ivice koloseka. Uzimajući u obzir sve napred navedeno, može se zaključiti da su rezultati detekcije primenom pragova određenih genetskim algoritmom zadovoljavajući.

## **5. Ocena rastojanja objekata na železničkoj pruzi u odnosu na sistem kamera**

Pravilno funkcionisanje mnogih sistema je veoma često uslovljeno posedovanjem velikog broja informacija iz okruženja. Informacije pružaju mogućnost identifikacije svih faktora koji mogu na bilo koji način oštetiti sistem ili dovesti u pitanje njegovo pravilno funkcionisanje. Kako saobraćajne tokove možemo posmatrati kao jedan veoma dinamičan sistem, postojanje objekta na pružnom prelazu, odnosno delu koloseka ili u okviru granice opasnog područja, predstavlja važan faktor sa stanovišta bezbednog odvijanja železničkog saobraćaja. Međutim, detekcijom (opažanjem) objekta se postiže prepoznavanje tog objekta kao potencijalne prepreke ali, da bi lice koje upravlja vučnim železničkim vozilom (mašinovođa) taj objekat identifikovalo kao prepreku, potrebno je da oceni rastojanje od vozila do objekta.

Međutim, zaustavni put zavisi od pravilne i pravovremene detekcije, ali i od drugih okolnosti kao što su brzina kretanja, konstrukcija vučnog vozila, vozna kompozicija, itd. Ovaj put se sastoji od puta reagovanja i puta kočenja. Put reagovanja je put koji kompozicija pređe za vreme koje je potrebno mašinovođi da reaguje na prepreku, odnosno da je detektuje, oceni rastojanje i donese odluku o trenutku početka kočenja i intenzitetu kočione sile, i vremenu potrebnom uređajima za kočenje da počnu da deluju. Ovaj niz složenih i odgovornih aktivnosti je baziran na okolnostima (zdravstveno i psiho-fizičko stanje mašinovođe, vidljivost, preglednost, itd.), znanju i iskustvu mašinovođe, a rezultira odlukom od koje može zavisiti da li će doći do saobraćajne nezgode ili ne, a utiče na težinu posledica nezgode. Put kočenja je put koji kompozicija pređe za vreme trajanja kočenja i zavisi od brzine i stanja koloseka. Stoga, važna komponenta inteligentnog sistema mašinske vizije za autonomno upravljanje železničkim vozilom predstavlja i ocena rastojanja od vozila do detektovanog objekta.

## 5.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

Merenje i ocena rastojanja ima veoma važnu ulogu u određivanju orijentacije i pozicije objekata u različitim primenama, naročito u robotskoj viziji, automobilskoj industriji i inteligentnim transportnim sistemima (ITS). Međutim, postoje dve vrste metoda koje se koriste za merenje i ocenu rastojanja između dva objekta – aktivni i pasivni [245]. Aktivne metode su zasnovane na korišćenju senzora (ultrazvučni, radar, laser, itd.), koji šalju različite vrste signala do objekta kako bi se izvršilo merenje rastojanja. Pasivne metode, korišćenjem kamera, primaju informaciju iz okolne sredine o poziciji objekta i na taj način vrše ocenu rastojanja od objekta do kamere [246].

Sistemi zasnovani na sensorima koriste različite metode rada za merenje rastojanja. Radar se zasniva na emitovanju visokofrekventnih elektromagnetnih talasa za merenje rastojanja i relativne brzine ciljnih objekata. Postoje dva glavna načina rada ovog sistema koji se koriste u ITS-u: impulsni i frekventni modulirani kontinualni talas (engl. *Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW)*). Impulsni radar zasnovan je na merenju vremena potrebnog da se kratki impuls od radarskog senzora emituje do objekta, reflektuje i vrati se do senzora. FMCW radar odašilje frekvencijski moduliran signal i koristi direktnu proporciju frekvencijske razlike između odlaznih i dolaznih talasa i relativne udaljenosti od ciljnog objekta. Ovaj sistem se nalazi u današnjim drumskim vozilima kao deo sistema za upozorenje o sudaru, pomoć u promeni vozne trake, pomoć u bočnom upozorenju i tempomata [247, 248]. Postoje tri vrste radara: radar kratkog dometa, sa opsegom merenja do 20 ili 30 m, radar srednjeg dometa do 100 m i dugog dometa do 250m. Trenutno dostupna tačnost radara iznosi od 10 cm do 1-5%, dok je tačnost brzine oko 0,2 m/s. Veoma su robustni i nisu toliko osetljivi na loše uslove okoline, ali nisu upotrebljivi na velikim udaljenostima [248].

LIDAR je sistem zasnovan na laseru i radi u bliskom infracrvenom području elektromagnetnog spektra na talasnoj dužini od 905 nm. Merenje udaljenosti zasniva se na vremenu potrebnom da refleksni svetlosni impulsi, kroz određenu sredinu, pređu odgovarajuće rastojanje. Postoji mogućnost korišćenja rotirajućeg uređaja i nekoliko laserskih izvora svetlosti za skeniranje tačaka u prostoru. Ovi sistemi se nazivaju laserski skeneri i mogu meriti tačke u jednoj ravni - 2D laserski skener i 3D laserski skener – pri čemu se može menjati ugao elevacije. Njihov maksimalni domet percepcije je između 80 i 200 m, zbog ograničenja snage prenosa, kako ne bi došlo do oštećenja očiju. Tačnost laserskih skenera je između 0,02 m i 0,5 m, dok je bočna tačnost ograničena njihovom ugaonom rezolucijom od oko 0,1°, a tačnost

brzine je 0,5 m/s. Laserski skeneri nisu robustni, jer su osetljivi na uslove u kojima rade, pa tako voda, prljavština, prašina, magla, itd. mogu značajno uticati na rad samog senzora [248].

Time-of-Flight (TOF) ili 3D kamera snima celu scenu jednim svetlosnim pulsem. Dobijanje informacija o rastojanju zasniva se na tome da svaki piksel kamere meri vremensko kašnjenje modulirane infracrvene svetlosti upoređujući fazu odlaznog i dolaznog signala. Radni domet za TOF je 10 m, u nekim slučajevima 20 m, a tačnost merenja je 1 cm. Ovi uređaji se koriste u industrijskoj automatizaciji i robotici, automobilima kod sistema za pomoć vozačima i bezbednosnim sistemima (prepoznavanje pešaka, pomoć pri parkingu i detekcija pre sudara) [248].

Sistemi zasnovani na viziji koriste pasivne metode kako bi se prikupile informacije o okruženju. Ovi sistemi obično koriste različite tehnike za obradu slika sa kamere kako bi detektovali objekat i/ili ocenili rastojanje između dva objekta. Postoje slučajevi kada sistemi koji koriste senzore nisu upotrebljivi, na primer za pomoć pri parkiranju. Za razliku od senzora, kao npr. ultrazvučni senzori kod kojih „slepe tačke” mogu da imaju veliki uticaj na robustnost i pouzdanost automatizovanog funkcionisanja parkiranja, kamere koje prikazuju više scena u okolini vozila, tzv. surround view cameras, mogu generisati tačnu topologiju tla oko vozila i pružiti informacije o lokaciji ivičnjaka, stubova i parking brava kao i promene sredine, kako bi vozač mogao da ima što bolji pregled prostora za parkiranje. Kamere rade obično između 15 fps i 25 fps, pa se njihov rad može uporediti sa radarskim sensorima i laserskim skenerima [53]. Međutim, relativna brzina se ne može direktno meriti, već se mora razlikovati od sukcesivnih slika. Kamere su, kao i čovekovo oko, osetljive na nepovoljne uslove osvetljenja i loše vremenske uslove, a mogu biti „zaslepljene” svetlošću koja je direktno ili indirektno usmerena na kameru. Sistemi zasnovani na viziji se obično grupišu u dve grupe: sistemi sa jednom kamerom (monokularni) i stereovizijski sistemi.

Monokularni sistemi poseduju jednu kameru koja snima slike i koristi geometriju scene kako bi se izvršila ocena rastojanja. U radu [249], autori su prikazali kako se za ocenu rastojanja može koristiti jedna kamera koja ima dvostruke otvore koji su prekriveni filterima u boji, pronalazeći relativne pomake između projekcija tačke na objektu kroz dva otvora. Postojanje veze između fizičke udaljenosti objekta od kamere i njegove visine na slici u pikselima, a zatim korišćenje mapiranja za ocenu rastojanja objekta pomoću jedne slike snimljene jednom kamerom, predstavljeno je u [250]. Ovom metodom postignuta je tačnost od čak 98,76%, ali njeno ograničenje se ogleda u tome što se može koristiti pri radu sa samo nekoliko osnovnih oblika poput pravougaonih, cilindričnih, trouglastih i kružnih. Pored toga, veza između



rastojanja i određene površine u pikselima na slici je korišćena kako bi se ocenilo rastojanje od kamere do lica čoveka, sa tačnošću od preko 95% [251]. Sa druge strane, autori u [252] su predložili model pomoću kog se kreira odnos između rezolucije objekta od interesa i njegovog rastojanja od kamere. Navedeni model je testiran na uzorku slučajno odabranih slika, a rezultati su pokazali grešku u opsegu 0,5 - 1 %. U sklopu sa kamerom, dodatni elementi kao što je rotirajuće ogledalo je korišćeno za ocenu rastojanja, tako što je kamera snimila sekvencu slika u ogledalu, a rastojanje je ocenjeno na osnovu toga što piksel za tačku na većem rastojanju ima veću brzinu kretanja u sekvenci slike u rotirajućem ogledalu [253]. Rezultati su pokazali da je greška zanemarljiva na rastojanju do 2 m, ali povećanjem rastojanja dolazi do povećanja greške - na rastojanju od 2,5 m, greška je iznosila oko 10 cm.

Sistemi za ocenu rastojanja od jedne kamere do objekta imaju široku primenu u različitim aplikacijama. Tako, kod automobila, odnos rastojanja između vozila i tačke iščezavanja, mereno u metrima, i rastojanja vozila sa sistemom i vozila ispred, mereno u pikselima, je korišćen da bi se ocenilo rastojanje između dva vozila [254]. Sa druge strane, kombinacijom metode zasnovane na tome da su udaljenost vozila i širina vozila obrnuto proporcionalni i metode zasnovane na mapiranju detektovanog vozila u 3D prostoru, postignuta je tačnost ocene rastojanja od 94,9%, ali je moguće koristiti samo u dnevnim uslovima [255]. Međutim, tri parametra – žižna daljina u pikselima, visina kamere merena od tla i y koordinata tačke na okviru kojim obeleženo detektovano vozilo, su korišćeni za ocenu rastojanja između sistema sa jednom kamerom i detektovanog vozila [256]. Ipak, kako bi povećali tačnost ocene, autori su predložili metodu homografije radi kompenzacije neželjenog neusklađivanja orijentacije kamere, koja je dala tačniju ocenu rastojanja u poređenju sa RADAR sistemom. Takođe, korišćenjem informacija o položaju vozila, vršeno je poboljšanje tačnosti ocene rastojanja između dva vozila, ali su rezultati pokazali da je ovaj metod upotrebljiv do međusobnog rastojanja od 30 metara [257]. Sa druge strane, za ocenu rastojanja je korišćena jedna kamera sa metodom inverznog perspektivnog mapiranja (IPM) da bi se omogućila transformacija RGB slike u pogled iz „ptičije perspektive”, u kojem postoji relacija između rastojanja na slici i u stvarnom svetu [258] i uklonio efekat perspektive u HSV prostoru boja [259]. Nedostatak ove metode je taj što je moguće koristiti je samo za manja rastojanja, jer se na većim rastojanjima greška značajno povećava. U radu [260] je predstavljena trigonometrijska tehnika zasnovana na položaju kamere koja se zasniva na poznatim parametrima (vidno polje kamere, visina kamere iznad nivoa puta i ugao kamere, itd.), koja je za mala rastojanja, pokazala bolje rezultate u poređenju sa IPM metodom. Za potrebe ocene

rastojanja između semafora i autonomnog drumskog vozila opremljenog jednom kamerom, testirane su tri metode: inverzno perspektivno mapiranje (IPM), IPM sa Kalmanovim filterom (KF) i IPM sa filterom čestica (PF) [261]. Rezultati ocene rastojanja su bili prihvatljivi, ali ovaj sistem ima ograničenja u scenarijima sa malom količinom osvetljenja, kada je Sunce iza semafora i oštećenim i prljavim semaforima. Pored navedenih, za ocenu rastojanja u različitim aplikacija su korišćene i metode veštačke inteligencije. Tako, za potrebe ocene rastojanja od kamere na bespilotnoj letelici do detektovanog objekta korišćen je SVR (engl. *support vector regressor* - SVR), a evaluacija na video snimcima je pokazala dobre rezultate [262]. Pored toga, sistem za ocenu rastojanja zasnovan na višeslojnoj veštačkoj neuronskoj mreži je prikazan u [263]. Ovaj sistem je obučen pomoću nadgledane tehnike učenja gde su ulazi ručno izračunati parametri okvira objekta koji su rezultat YOLO klasifikatora objekta, a izlazi su merenja rastojanja do objekata u snimljenoj sceni pomoću 3D laserskog skenera. Evaluacija sistema izvedena je na RGB slikama, snimljenim u dnevnim uslovima, i to sa scenama železničke infrastrukture u rasponu od 100 m do 300 m i sa scenama puta u rasponu od 6 do 30 metara.

Stereovizijski sistemi u osnovi koriste dve kamere kako bi, pomoću 3D koordinata objekta, izvršili ocenu rastojanja od sistema do objekta [248]. Većina ovih sistema koriste RGB kamere, tako da mogu da rade samo u dnevnim uslovima. Takav jedan sistem je i prikazan u radu [264], gde se vršila ocena rastojanja od objekata koji su se nalazili na realnim rastojanjima od 10, 20, 30, 40, 50 i 60 m, tako što je korisnik birao objekat na levoj kameri, a algoritam je pronalazio sličan objekat na desnoj kameri. Isti, stereovizijski metod, je korišćen za poređenje rezultata ocene rastojanja stereovizijskog sistema i izmerenih rastojanja digitalnim laserskim daljinometrom, i to 19, 46, 66 i 103 cm sa rezolucijom od  $\pm 0,5$  [265]. Greška ocene rastojanja je bila u opsegu od 1,13 % do -2,05 %, pri čemu se, sa povećanjem rastojanja, povećavala i greška. Stereovizijski sistemi imaju široku primenu u različitim oblastima. Tako, ovaj sistem je korišćen u automatskom sistemu za berbu voća na rastojanjima od 205 mm do 2050 mm sa greškom od 2 % do 6 %, a kako bi se ocenili veličina, rastojanje i položaj voća da bi robotska ruka mogla da isto ubere [266]. Pored toga, ovi sistemi se koriste i kod automobila, i to za ocenu rastojanja od vozila do lopte, gde je sistem pokazao dobru tačnost do rastojanja od 160 m, sa maksimalnom greškom od 6,25 % [246], ali i za ocenu rastojanja od vozila do prinudnog usporivača brzine (poznatijeg kao „ležeći policajac”), sa tačnošću od  $\pm 20$  cm u rasponu od 2 - 10 m. Takođe, stereovizijski princip je korišćen zajedno sa drugim sensorima, i to jedna kamera sa inercijalnim senzorom [267, 268], kao i hibridno rešenje stereovizijskog

sistema na robotskoj platformi kome je dodata pregledna tabela sa metodom fitovanja krive, koje je tokom eksperimenata pokazalo prosečnu tačnost ocene rastojanja od 97,69% [269].

## 5.2. Ocena rastojanja primenom homografije

Homografija, je definisana kao inverzno preslikavanje  $h: P^2 \rightarrow P^2$  takvo da tri tačke  $x_1$ ,  $x_2$  i  $x_3$  leže na istoj pravoj, ako i samo ako i tačke  $h(x_1)$ ,  $h(x_2)$  i  $h(x_3)$  leže na istoj pravoj [270]. Drugačiji naziv za homografiju je projektivnost. Međutim, na ovaj način je projektivnost definisana u geometrijskom smislu. Ekvivalentna algebarska definicija projektivnosti je da preslikavanje  $h: P^2 \rightarrow P^2$  jeste projektivnost, ako i samo ako postoji nesingularna matrica  $\mathbf{H}$  dimenzija  $3 \times 3$ , takva da za svaku tačku u  $P^2$  predstavljenu vektorom  $\mathbf{x}$  važi  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}\mathbf{x}$  [270]. Projektivna transformacija u ravni, koja je korišćena za ocenu rastojanja, predstavlja linearnu transformaciju vektora homogenih koordinata množenjem nesingularnom matricom dimenzija  $3 \times 3$  [270]. To je prikazano u izrazu (41), odnosno u kraćem zapisu u izrazu (42) [270, 271, 149]:

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}\mathbf{x}. \quad (37)$$

Matrica  $\mathbf{H}$  je matrica homografije i ima osam stepeni slobode od devet elemenata. Dakle, jedan element matrice  $\mathbf{H}$  može imati proizvoljnu vrednost i obično se uzima da je  $h_{33} = 1$  [271, 149]. Na osnovu toga, ocena rastojanja ima dve faze – izračunavanje matrice homografije  $\mathbf{H}$  i preslikavanje (mapiranje) piksela sa jedne na drugu sliku.

Dakle, polazi se od digitalne slike koja sadrži projektivnu distorziju, gde se, kao posledica iste, javljaju deformacije objekata u sceni. Na primer, na slici sa kolosekom (Slika 5.1), uočavamo da šine nisu paralelne, već se seku u nekoj tački, dok su u realnosti šine paralelne, što jeste posledica projektivne distorzije.



*Slika 5.1 Slika sa kolosekom - projektivna distorzija*

Postupak ocene rastojanja počinje mapiranjem jedne tačke iz ravni realnog okruženja u ravan slike [271]. Koordinate te tačke u realnosti  $(x, y)$  možemo zadati u odnosu na proizvoljno izabran koordinatni sistem, pa se proširivanjem sa brojem 1, dobija jednačina sa homogenim koordinatama  $(x, y, 1)^T$ . Homografijom se dobija tačka čije su homogene koordinate u opštem slučaju date kao  $(x'_1, x'_2, x'_3)^T$ . Sada se dobija izraz [271, 149] :

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (38)$$

Stvarne koordinate  $(x', y')$  tačke na slici, odnosno nehomogene koordinate mapirane tačke, se dobijaju sledećim izrazima [271, 149]:

$$x' = \frac{x'_1}{x'_3} = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad y' = \frac{x'_2}{x'_3} = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (39)$$

Za određivanje matrice homografije  $\mathbf{H}$ , potrebno je znati koordinate bilo koje četiri tačke na slici i koordinate istih tačaka u realnom okruženju, pri čemu nikoje tri nisu kolinearne. Poslednji element matrice homografije je  $h_{33} = 1$ , kako bi izlazna slika bila u razmeri sa izabranom jedinicom za dužinu. Dakle, ako su poznate koordinate četiri tačke, sistem linearnih jednačina može biti zapisan u matričnoj formi) [271, 149]:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1x'_1 & -y_1y'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1y'_1 & -y_1x'_1 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2x'_2 & -y_2y'_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_2y'_2 & -y_2x'_2 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3x'_3 & -y_3y'_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_3y'_3 & -y_3x'_3 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4x'_4 & -y_4y'_4 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_4y'_4 & -y_4x'_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ x'_2 \\ y'_2 \\ x'_3 \\ y'_3 \\ x'_4 \\ y'_4 \end{bmatrix} \quad (40)$$

ili u kraćem zapisu [271, 149]:

$$\mathbf{Ah} = \mathbf{b}, \quad (41)$$

gde matrica  $\mathbf{A}$  predstavlja matricu sistema,  $\mathbf{h}$  je vektor elemenata matrice homografije  $\mathbf{H}$ , a  $\mathbf{b}$  je vektor koordinata mapiranih tačaka. Vektor  $\mathbf{h}$  se može odrediti kao [271, 149]:

$$\mathbf{h} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}. \quad (42)$$

Međutim, za ocenu rastojanja od kamere do određene tačke (objekta) u realnom okruženju, potrebno je izračunati inverznu matricu homografije  $\mathbf{H}$  i znati koordinate te tačke na slici. Upravo zbog toga, homografija se može koristiti jer, za razliku od većine drugih metoda, potrebna je samo jedna kamera, pri čemu nije neophodno poznavati njene parametre.

U toku istraživanja, a kao deo SMART projekta, homografija je korišćena za ocenu rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta. Detekcija objekata je prikazana u poglavlju 3 ove doktorske disertacije. Ocena je vršena u različitim scenarijima snimljenim termovizijskom kamerom i sistemom noćne vizije u noćnim uslovima, i to na lokacijama Babin Potok i Žitorada.

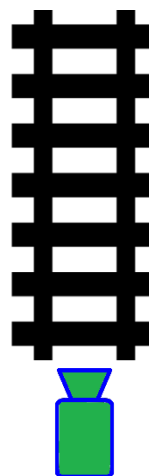
U scenariju prikazanom na slici 5.2, snimljenim termovizijskom kamerom na lokaciji Babin Potok, objekti su stajali na koloseku, na rastojanjima u opsegu od 50 do 500 metara od sistema mašinske vizije. Pozicija termovizijske kamere u odnosu na kolosek je prikazana na slici 5.3, gde je njena optička osa paralelna sa kolosekom. Za izračunavanje matrice homografije  $\mathbf{H}$ , korišćene su četiri tačke – temena plavog četvorougla (Slika 5.4 (a)). Koordinate ovih tačaka u realnosti su određene na osnovu stvarnih pozicija objekata – ljudi na koloseku u odnosu na kameru, a koordinate istih tačaka na slici su određene očitavanjem sa slike [149].



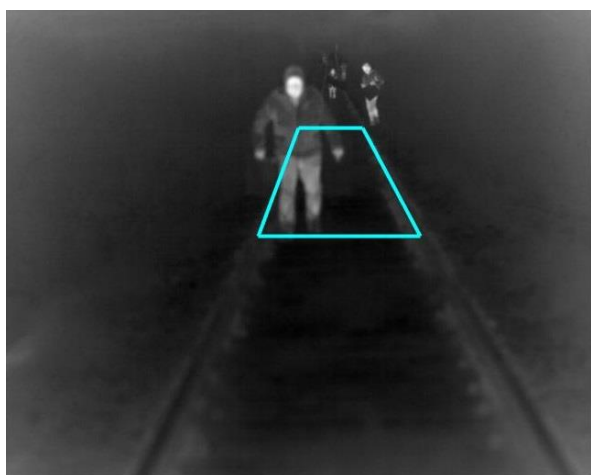
**Slika 5.2** Lokacija Babin Potok:  
Scenario za ocenu rastojanja [149]

Izračunata matrica homografije je:

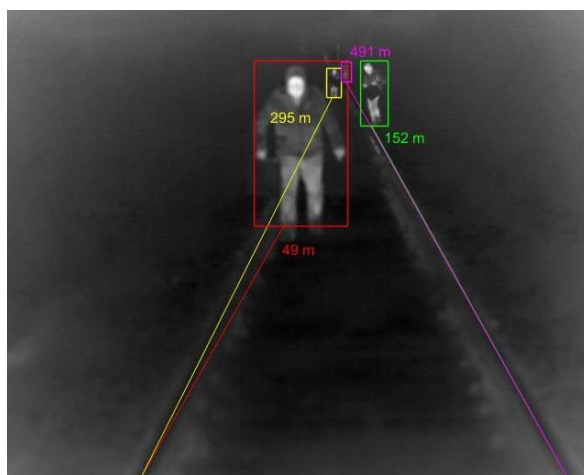
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 5,3636 & 0,2262 & 415,4545 \\ 0 & 0,0342 & 880,9091 \\ 0 & 0,0006 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$



**Slika 5.3** Lokacija Babin Potok: Pozicija  
termovizijske kamere u odnosu na kolosek



(a)



(b)

**Slika 5.4** Lokacija Babin Potok: Tačke za izračunavanje matrice homografije  $\mathbf{H}$  (a);  
ocenjena rastojanja do detektovanih objekata (b) [149]

U daljem postupku ocene rastojanja, korišćena je inverzna matrica homografije, pa su ocenjena rastojanja do četiri detektovana objekta (Slika 5.4 (b)): 49 m (označeno crvenom bojom), 152 m (označeno zelenom bojom), 295 m (označeno žutom bojom) i 491 m (označeno roze bojom). Za validaciju rezultata ocene, izvršeno je merenje stvarnih rastojanja od termovizijske kamere do objekata - ljudi uključenih u eksperiment. Izmerena rastojanja 50, 150, 300 i 500 m, respektivno, su upoređena sa ocenjenim i utvrđena je maksimalna greška

ocene od 2 %, što je zadovoljavajuće (Tabela 5.1). Greška ocene je posledica proračuna matrice homografije kao i detekcije objekta. [149].

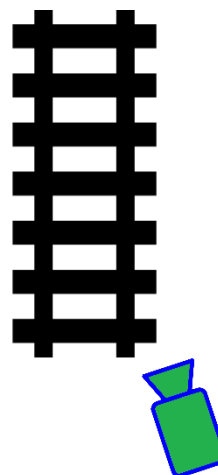
**Tabela 5.1** Rezultati ocene rastojanja homografijom – lokacija Babin Potok

Broj merenja	Izmereno realno rastojanje [m]	Rastojanje ocenjeno homografijom [m]	Greška ocene rastojanja [m]	Greška ocene rastojanja [%]
1.	50	49	1	2
2.	150	152	2	1,33
3.	300	295	5	1,67
4.	500	491	9	1,8

U daljem toku istraživanja, ocena rastojanja je vršena na lokaciji Žitorađa, zbog drugačijeg terena i okruženja. Četiri objekta – članova SMART projektnog tima, su bila raspoređena na koloseku i to na rastojanjima od sistema mašinske vizije: 50, 150, 400 i 600 metara, redom (Slika 5.5). Termovizijska kamera je bila postavljena na poziciji koja je prikazana na slici 5.6.



**Slika 5.5** Lokacija Žitorađa: Objekti na koloseku



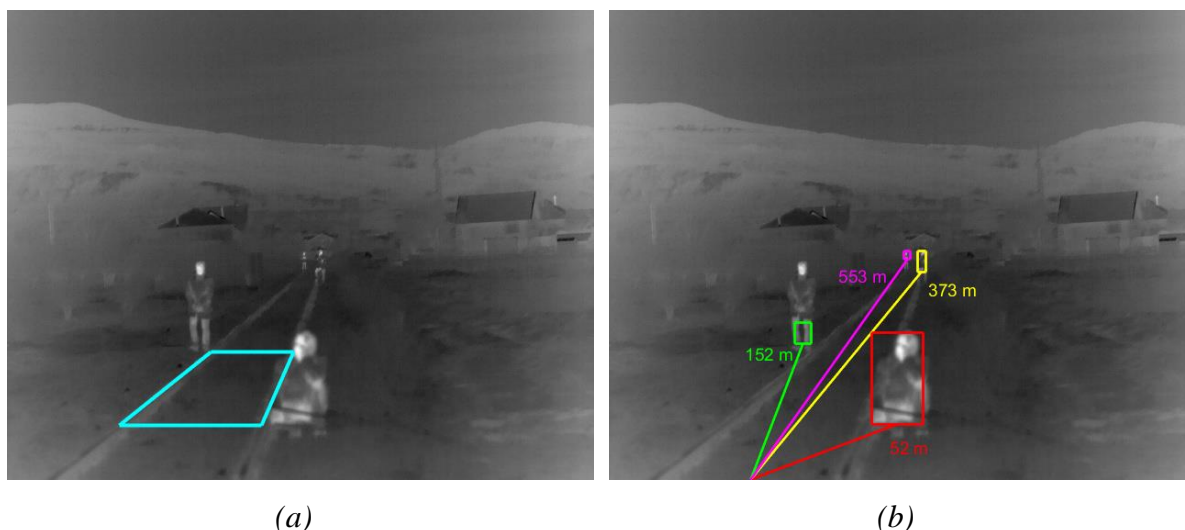
**Slika 5.6** Lokacija Žitorađa: Pozicija termovizijske kamere u odnosu na kolosek

Matrica homografije  $H$  (data izrazom (44)) je izračunata pomoću četiri tačke – temena plavog četvorougla (Slika 5.7 (a)). Primetna je razlika u vrednostima elemenata matrice homografije, što je i razumljivo s obzirom na sasvim drugačiju poziciju kamere i terena. S obzirom da su detektovani objekti u postupku detekcije bili obeleženi pravougaonicima (u daljem tekstu BB), vršena je ocena rastojanja do sredine BB. Rezultati ocene rastojanja su prikazani na slici 5.7 (b), i to: 52 m (označeno crvenom bojom), 152 m (označeno zelenom

bojom), 373 m (označeno žutom bojom) i 572 m (označeno roze bojom). U ovom slučaju može se primetiti rast greške ocene sa porastom rastojanja objekta od kamere (

Tabela 5.2).

$$H = \begin{bmatrix} 3,4875 & 0,188 & 26,1250 \\ 0 & 0,1364 & 949 \\ 0 & 0,0005 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$



*Slika 5.7 Lokacija Žitorađa: Tačke za izračunavanje matrice homografije  $H$  (a), ocenjena rastojanja do detektovanih objekata (b)*

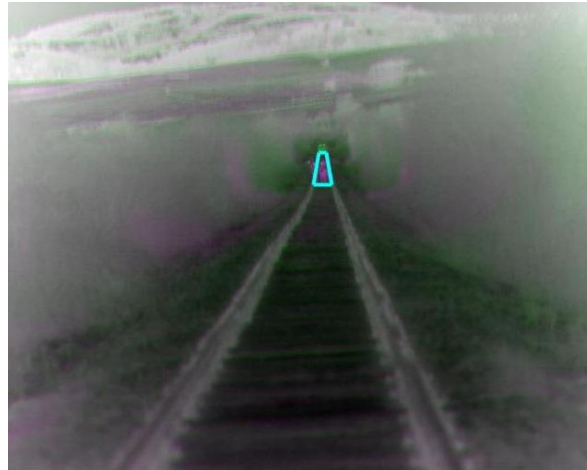
*Tabela 5.2 Rezultati ocene rastojanja homografijom – lokacija Žitorađa*

<i>Broj merenja</i>	<i>Izmereno realno rastojanje [m]</i>	<i>Rastojanje ocenjeno homografijom [m]</i>	<i>Greška ocene rastojanja [m]</i>	<i>Greška ocene rastojanja [%]</i>
1.	50	52	2	4
2.	150	152	2	1,33
3.	400	373	27	6,75
4.	600	553	47	7,83

Međutim, za potrebe ocene rastojanja kada se objekat nalazi na rastojanjima u opsegu od 400 - 950 metara od sistema mašinske vizije, vršeno je ispitivanje mogućnosti primene homografije na lokaciji Babin Potok. Ova lokacija je izabrana zbog pogodnosti samog terena. Iz prethodnih eksperimenata je jasno da, kada se matrica homografije računa na osnovu koordinata objekata koji se nalaze na relativno malom rastojanju od sistema mašinske vizije, dolazi do povećanja greške ocene sa povećanjem rastojanja objekta od kamere. Zbog toga je



vršeno računanje matrice homografije, na napred opisan način, korišćenjem potrebnih koordinata kada se objekti nalaze na 400 i 950 metara od termovizijske kamere (Slika 5.8). Kamera je postavljena na poziciji kao na slici 5.3. Izračunata matrica homografije je data izrazom (45).



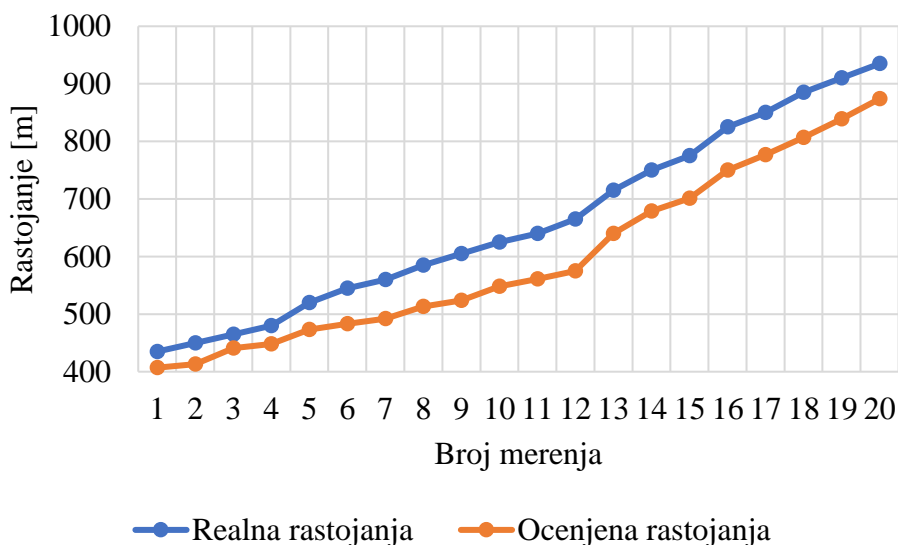
*Slika 5.8 Lokacija Babin Potok: Tačke za izračunavanje matrice homografije  $H$  za velika rastojanja*

$$H = \begin{bmatrix} -0,3881 & -0,0405 & 347,1960 \\ 0,0843 & -0,0171 & -54,2011 \\ 0,0004 & -0,0001 & 1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

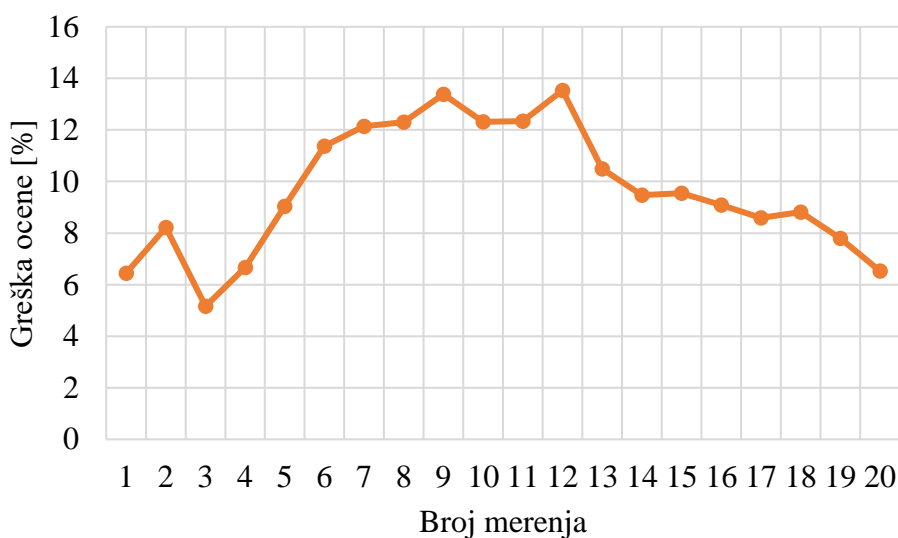
Ocena rastojanja je vršena na setu od 20 termovizijskih slika, pri čemu su pozicije objekata na svim slikama bile različite, uzimajući u obzir obuhvat celog opsega rastojanja. Evaluacija je izvršena na osnovu eksperimentalnih podataka, odnosno merenjem realnog rastojanja detektovanih objekata od termovizijske kamere. Postupak detekcije objekata je prikazan u poglavlju tri ove doktorske disertacije. Rezultati prikazani u tabeli 5.3 i na dijagramima prikazanim na slici 5.9 i slici 5.10, pokazuju da je minimalna greška ocene na rastojanjima koja su blizu krajeva opsega, koji je korišćen za izračunavanje matrice homografije.

**Tabela 5.3** Rezultati ocene rastojanja homografijom u opsegu 400 – 950 m -  
Lokacija Babin Potok

<b>Broj merenja</b>	<b>Izmereno realno rastojanje [m]</b>	<b>Rastojanje ocenjeno homografijom [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [%]</b>
1.	435	407	28	6,44
2.	450	413	37	8,22
3.	465	441	24	5,16
4.	480	448	32	6,67
5.	520	473	47	9,04
6.	545	483	62	11,38
7.	560	492	68	12,14
8.	585	513	72	12,31
9.	605	524	81	13,39
10.	625	548	77	12,32
11.	640	561	79	12,34
12.	665	575	90	13,53
13.	715	640	75	10,49
14.	750	679	71	9,47
15.	775	701	74	9,55
16.	825	750	75	9,09
17.	850	777	73	8,59
18.	885	807	78	8,81
19.	910	839	71	7,8
20.	935	874	61	6,52

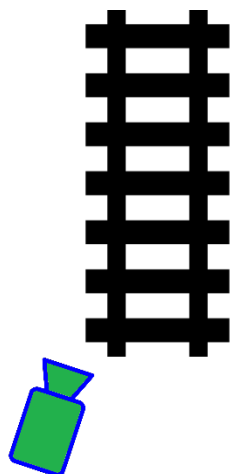


**Slika 5.9** Poređenje realnih i rastojanja ocenjenih homografijom



**Slika 5.10** Greška ocene rastojanja homografijom

Ocena rastojanja homografijom je vršena i kod sistema noćne vizije. Na lokaciji Žitorađa, snimljene su dve slike sistemom noćne vizije sa objektom na rastojanjima od 50 i 100 m od sistema mašinske vizije, kamera sistema noćne vizije je bila na poziciji u odnosu na kolosek kao što je prikazano na slici 5.11. Fuzijom slika, dobijene su potrebne tačke za izračunavanje matrice homografije  $H$  (Slika 5.12), pa je ista izračunata i data izrazom (46):



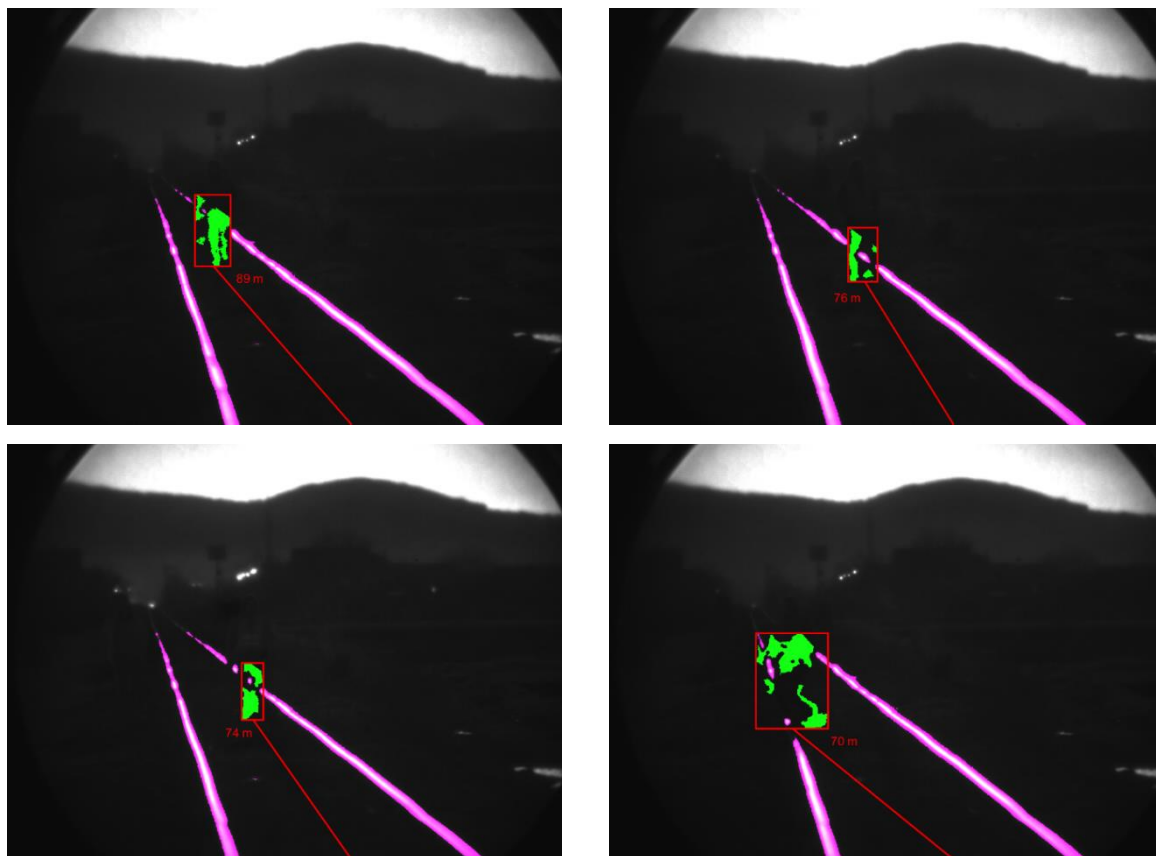
*Slika 5.11 Lokacija Žitorađa: Pozicija sistema noćne vizije u odnosu na kolosek*



*Slika 5.12 Lokacija Žitorađa: Tačke za izračunavanje matrice homografije  $\mathbf{H}$  – sistem noćne vizije*

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -24,2809 & -0,5485 & -684,0977 \\ -1,1670 & -0,6427 & -3008,4 \\ -0,0049 & -0,0025 & 1 \end{bmatrix} \quad (46)$$

Kretanje objekta je bilo predviđeno drugom grupom scenarija opisanim u trećem poglavlju ove doktorske disertacije, kako bi se simuliralo njegovo proizvoljno kretanje duž železničke infrastrukture u opsegu rastojanja od 50 do 100 m, mereno od sistema. U četiri scenarija, u kojima je detektovan objekat, vršena je ocena rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta. Rastojanja ocenjena homografijom su 89, 76, 74 i 70 m (Slika 5.13), međutim, zbog proizvoljnog kretanja objekta, nije bilo moguće izvršiti evaluaciju rezultata poređenjem ocenjenih i realnih rastojanja. Ipak, sva ocenjena rastojanja su u opsegu u kome je i scenarijima bilo predviđeno kretanje objekta.



*Slika 5.13 Lokacija Žitorađa: Ocenjena rastojanja od sredine koloseka do detektovanih objekata – sistem noćne vizije*

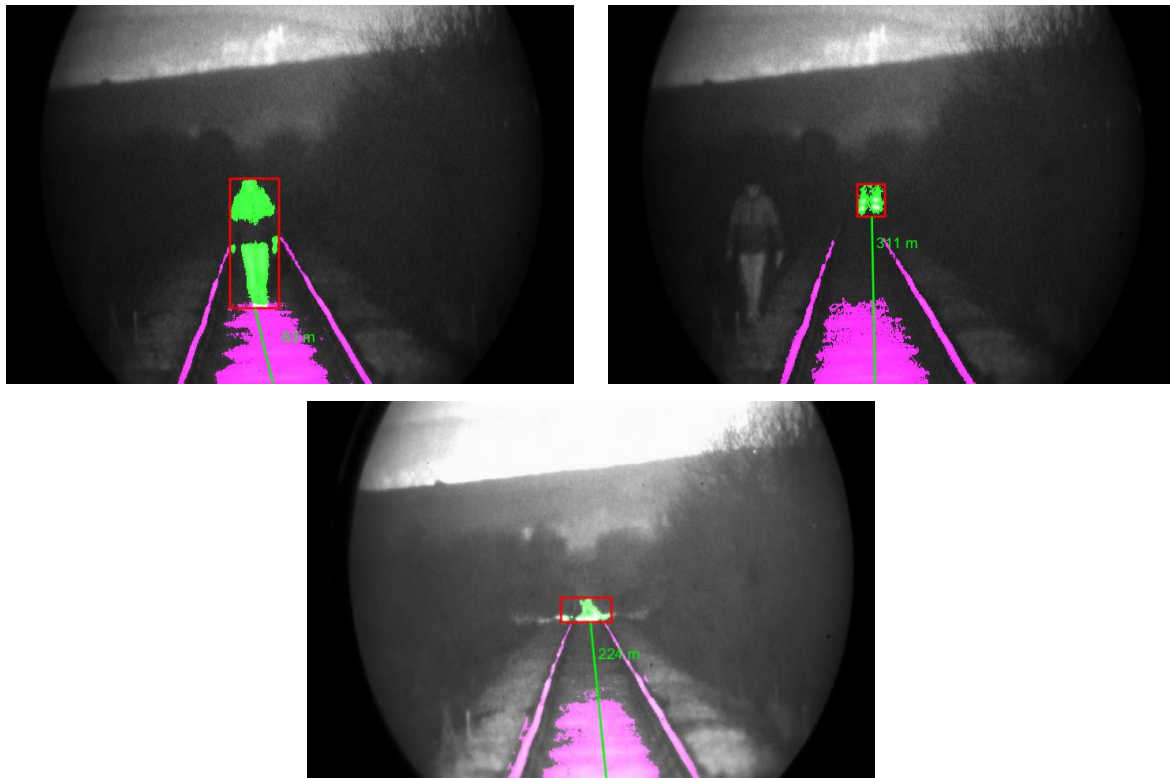
Kako bi se proverila mogućnost korišćenja homografije kod sistema noćne vizije i na drugoj lokaciji, ocena rastojanja je vršena i na lokaciji Babin Potok. Kamera je postavljena na poziciji kao na slici 5.3, a tačke za izračunavanje matrice homografije  $H$  su određene tako što su dva člana projektnog tima SMART bila na rastojanjima od 50 i 100 m od sistema mašinske vizije (Slika 5.14). Matrica homografije  $H$  je izračunata na napred opisan način i data izrazom (47).



*Slika 5.14 Lokacija Žitorađa: Tačke za izračunavanje matrice homografije  $H$  – sistem noćne vizije*

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 11,3929 & 0,5302 & 592,1667 \\ 0 & 0,4133 & 1935,7 \\ 0 & 0,0017 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

U postupku ocene rastojanja od sistema noćne vizije do detektovanog objekta na koloseku, korišćena je inverzna matrica homografije  $\mathbf{H}$ , i to u tri scenarija, opisana u trećem poglavlju ove doktorske disertacije. Ocenjena rastojanja su 63, 311 i 224 m i prikazana su na slici 5.15. Kako bi se izvršila evaluacija, vršena su merenja realnih rastojanja objekata. Rezultati merenja su pokazali da su objekti bili na rastojanjima od 65, 330 i 235 m, redom, što pokazuje da greška ocene raste sa porastom rastojanja (Tabela 5.4). S obzirom na to da detekcija objekata primenom sistema noćne vizije nije izvršena na većim rastojanjima, za takve uslove nije ni bilo moguće izvršiti ocenu rastojanja homografijom.



*Slika 5.15 Lokacija Babin Potok: Ocenjena rastojanja od sistem noćne vizije do detektovanih objekata*

**Tabela 5.4** Rezultati ocene rastojanja homografijom na lokaciji Babin Potok –  
sistem noćne vizije

<b>Broj merenja</b>	<b>Izmereno realno rastojanje [m]</b>	<b>Rastojanje ocenjeno homografijom [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [%]</b>
1.	65	63	2	3,08
2.	330	311	19	5,76
3.	235	224	11	4,68

### 5.3. Ocena rastojanja primenom FuzzyH sistema

Analiza rezultata ocene rastojanja homografijom pokazala je da se, u većini scenarija, greška ocene povećavala sa povećanjem rastojanja objekta od kamere. Pored toga, pokazalo se da su ta veća rastojanja van opsega koji su korišćeni za izračunavanje matrice homografije  $H$ . Međutim, ono što je još uočeno, konkretno u primeni homografije na opsegu rastojanja od 400 do 950 metara, je da je greška ocene minimalna na rastojanjima koja su blizu krajeva opsega, koji je korišćen za izračunavanje matrice homografije, a maksimalna je na rastojanjima koja su udaljena od opsega. Zbog toga se javila potreba za korišćenjem tehnika iz domena veštačke inteligencije, pa je, u okviru istraživanja, razvijen je hibridni sistem, nazvan FuzzyH. Ovaj sistem integriše fazi logiku i homografiju, sa ciljem da se, korišćenjem više matrica homografije iz opsega u sprezi sa fazi logikom, poveća tačnost ocene rastojanja.

Ideju fazi logike je, još 1965. godine, postavio Lofti A. Zadeh, profesor na Univerzitetu u Berkliju, SAD [272]. Međutim, tek 1974. godine dolazi do primene te ideje, tako što je Ebrahim H. Mamdani, profesor na London Univerzitetu, praktično primenio fazi logiku kako bi upravljao automatskom parnim motorom. Zatim, 1976. godine, kompanije Blue Circle Cement i SIRA u Danskoj su razvili fazi logičko upravljanje peći za cement u industriji. Taj sistem je počeo sa radom 1982. godine, a kasnije su počele primene i u industrijskim i proizvodnim procesima, proizvodnji automobila, bankama, bolnicama, bibliotekama i akademskom obrazovanju, kućnim aparatima, itd., da bi danas fazi logika postala direktno ili indirektno sastavni deo života skoro svakog čoveka [272, 273, 274].

U klasičnoj teoriji skupova, tzv. *crisp* skupova, postoji skup  $A$ , koji je definisan na univerzalnom skupu  $X$ . Neki element  $x$  iz skupa  $X$ , može da pripada ili ne pripada skupu  $A$ , odnosno elementu  $x$  se može dodeliti jedna od dve vrednosti, 1 i 0, koji pokazuje njegovu pripadnost ili nepripadnost skupu  $A$ . Međutim, u teoriji fazi skupova, uvodi se pojam kontinualne funkcije pripadnosti  $\mu_A(x)$ , koja pokazuje koliki je stepen pripadnosti elementa  $x$

skupu  $A$ , tako da funkcija pripadnosti može imati bilo koju vrednost između 0 i 1 [140]. Dakle, fazi skup  $A$  u  $X$  se opisuje funkcijom pripadnosti [272]:

$$\mu_A(u): X \rightarrow [0,1], \quad (48)$$

gde je  $\mu_A(x)$  stepen pripadnosti elementa  $x$  u fazi skupu  $A$  za  $\forall x \in X$ . Fazi skup  $A$  se može predstaviti skupom parova [272]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\}. \quad (49)$$

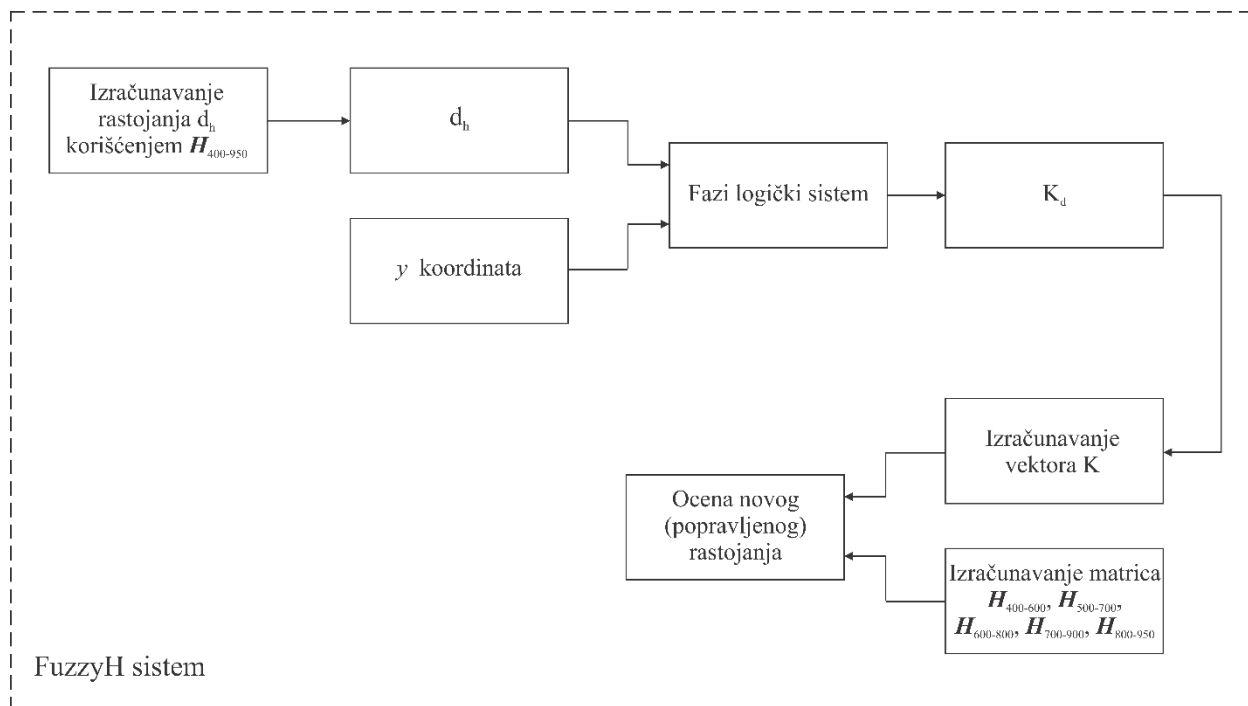
U svakodnevnom govoru, čovek koristi različite pojmove kako bi opisao određene predmete: visok čovek, lep auto, ukusno jelo, loše vreme, itd. Iako ovi pojmovi zvuče jednostavno, oni su veoma složeni za predstavljanje i razumevanje, pa njihovo precizno opisivanje, u smislu korišćenja brojeva, nema smisla. Dakle, čovek lingvistički opisuje predmet i/ili pojavu, koja je za njega jednostavna i jasna, što zapravo fazi pogled na svet pokušava da analizira i praktično upotrebi [272].

Proces primene fazi logičkog sistema obuhvata tri koraka: fazifikacija, zaključivanje i defazifikacija. Fazifikacijom ulaznih podataka se vrši transformisanje *crisp* (ne-fazi) ulaza i izlaza u adekvatne fazi oblike, odnosno za ulaznu promenljivu se određuje stepen pripadnosti određenoj (prethodno kreiranoj) funkciji pripadnosti. Stepenu pripadnosti se opisuje dodeljivanjem određenih atributa u vidu lingvističkih vrednosti sa fazi komponentama, kako bi se mogli koristiti u koraku zaključivanja. Na primer, za upravljanje klimom uređajem, promenljive temperature i upravljačkog signala se transformišu u lingvističke promenljive, kao što su „visoka”, „srednja” i „niska” za temperaturu, i „brzo”, „srednje” i „sporo” za broj obrtaja motora. Korak zaključivanja zahteva postojanje baze fazi pravila, koja se kreira kombinovanjem funkcija pripadnosti. Funkcije pripadnosti se određuju za svaku ulaznu i izlaznu promenljivu, ponaosob. Fazi pravila imaju formu „ako-onda” (engl. „*if-then*”) iskaza odnosno uzročno-posledično tvrđenje. Na primer, „ako je temperatura *visoka*, onda motor radi *brzo*”. Takođe, pravilo se može sastojati i od više tvrđenja koja su povezani logičkim veznicama „i”, „ili” i „ne”. Funkcionalni fazi sistem poseduje bazu pravila, obično kreiranu od strane eksperata, koji izuzetno dobro poznaju proces u kome se koristi fazi logika. U koraku zaključivanja, odlučuje se koja pravila iz baze će se koristiti prilikom zaključivanja, a zatim se ta pravila primenjuju na prethodno transformisan ulaz. Zatim se u koraku defazifikacije, dobijeni izlaz transformiše iz lingvističke promenljive u *crisp* promenljivu [273, 275]. Svrha koraka defazifikacije je pretvaranje izlaza iz koraka zaključivanja, odnosno fazi zaključka u jedan realan broj. Naročito, ovaj korak je obavezan pri izradi fazi kontrolera, jer upravljački signal (npr. jačina struje, napon, itd.), koji ide ka objektu upravljanja, mora biti diskretna

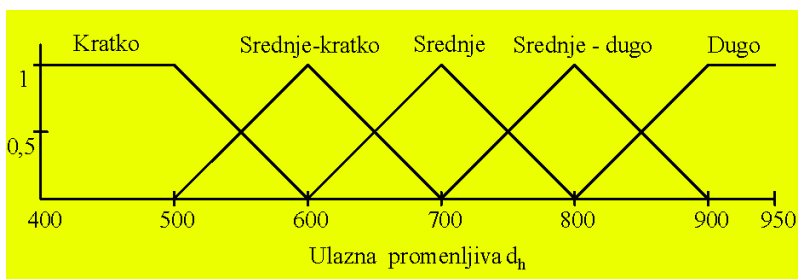


veličina. Broj dobijen defazifikacijom jeste realan predstavnik fazi zaključka, dakle nije proizvoljan.

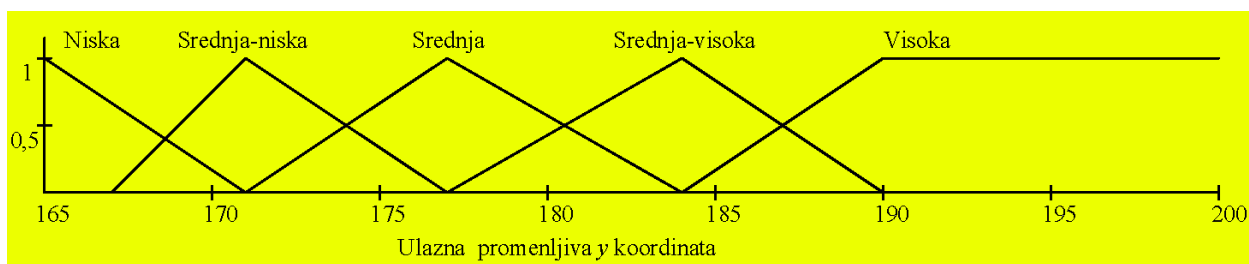
Razvijeni hibridni FuzzyH sistem je zasnovan na integraciji homografije i fazi logike, tako što se rezultat ocene rastojanja homografijom koristi kao jedna od ulaznih promenljivih u fazi logički sistem (Slika 5.16), koji ima dve ulazne i jednu izlaznu promenljivu. Dakle, izračunava se matrica homografije  $H_{400-950}$  korišćenjem podataka o poziciji objekata na rastojanjima od 400 i 950 metara od sistema mašinske vizije, što je već učinjeno u okviru ocene rastojanja homografijom. Zatim se, korišćenjem te matrice, odnosno inverzne matrice, vrši ocena rastojanja  $d_h$  do prethodno detektovanog objekta u regionu od interesa. Ocenjeno rastojanje  $d_h$  i  $y$  koordinata sredine BB na termovizijskoj slici su ulazne promenljive u fazi logički sistem, Mamdani model, jer je u toku istraživanja uočeno da  $x$  koordinata nema uticaja na rad fazi logičkog sistema. Opseg ocenjenog rastojanja  $d_h$  je od 400 do 950 metara, pa je opseg podeljen na pet podopsega, tako da je definisano pet funkcija pripadnosti (Slika 5.17). Druga ulazna promenljiva, vrednost  $y$  koordinate na slici u pikselima, je određena za tačku koja je sredina BB koji se nalazi oko detektovanog objekta pa je, na osnovu istraživanja, definisano pet funkcija pripadnosti (Slika 5.18). Izlazna promenljiva fazi logičkog sistema je koeficijent rastojanja  $K_d$ , sa opsegom od 0 do 1, koji se koristi kako bi se povećala tačnost ocene rastojanja. Funkcije pripadnosti izlazne promenljive su prikazane na slici 5.19.



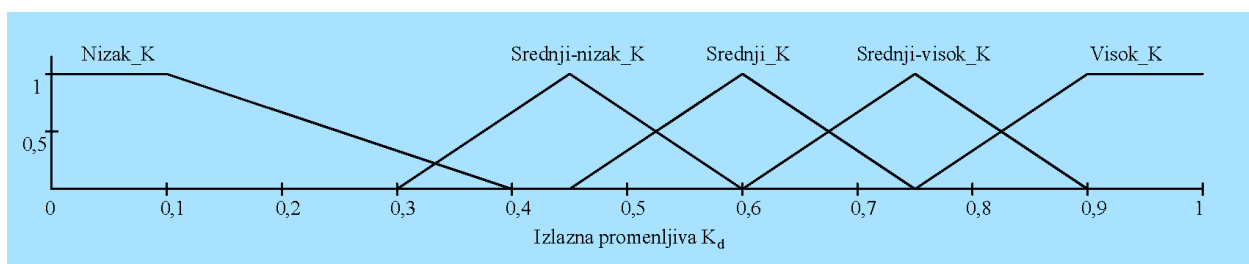
Slika 5.16 Blok dijagram FuzzyH sistema



Slika 5.17 Funkcija pripadnosti prve ulazne promenljive  $d_h$



Slika 5.18 Funkcija pripadnosti druge ulazne promenljive  $y$  koordinata



Slika 5.19 Funkcija pripadnosti izlazne promenljive  $K_d$

Baza pravila sadrži listu pravila koje se odnose na lingvističke promenljive, pa je maksimalno moguć broj pravila određen brojem ulaznih promenljivih i brojem lingvističkih vrednosti. Neka od pravila za FuzzyH sistem su prikazana u tabeli 5.5.

Tabela 5.5 Pojedina fazi pravila iz baze hibridnog FuzzyH sistema

	$d_h$		$y$ koordinata		$K_d$
Ako je	Kratko	i	Visoka	onda	Visok_K
	Dugo		Niska		Visok_K
	Srednje-kratko		Srednja-visoka		Srednje-nizak_K
	Srednje		Srednja		Srednji_K
	Srednje-dugo		Srednja-niska		Srednje-visok_K

Nakon izračunavanja koeficijenta rastojanja  $K_d$ , vrši se izračunavanje pet novih matrica homografije, korišćenjem koordinata objekata koji se nalaze na sledećim rastojanjima: 400 i 600 m, 500 i 700 m, 600 i 800 m, 700 i 900m, 800 i 950 m. Tako je izračunato pet novih matrica homografije  $H_{400-600}$ ,  $H_{500-700}$ ,  $H_{600-800}$ ,  $H_{700-900}$  i  $H_{800-950}$ , redom. Za ocenu novog (popravljenog) rastojanja, potrebno je pomnožiti kompenzacioni faktor  $K$  sa odgovarajućim inverznim matricama  $H^{-1}_{400-600}$ ,  $H^{-1}_{500-700}$ ,  $H^{-1}_{600-800}$ ,  $H^{-1}_{700-900}$  i  $H^{-1}_{800-950}$ . Kompenzacioni faktor  $K$  je vektor sa pet elemenata  $(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5)$ , koji zadovoljavaju uslov:

$$\sum_{i=1}^5 K_i = 1 \quad (50)$$

Izračunavanje svakog elementa vektora  $K$  je povezano sa opsegom ocenjenog rastojanja  $d_h$  i izračunatim koeficijentom rastojanja  $K_d$ . Elementi vektora  $K$  su izračunati korišćenjem sledećih izraza:

$$(400 \leq d_h \leq 500) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = 1; \\ K_2 = 0; \\ K_3 = 0; \\ K_4 = 0; \\ K_5 = 0. \end{cases} \quad (51)$$

$$(500 < d_h \leq 600) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = K_d; \\ K_2 = 1 - K_d; \\ K_3 = 0; \\ K_4 = 0; \\ K_5 = 0. \end{cases} \quad (52)$$

$$(600 < d_h \leq 700) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = 0; \\ K_2 = K_d; \\ K_3 = 1 - K_d; \\ K_4 = 0; \\ K_5 = 0. \end{cases} \quad (53)$$

$$(700 < d_h \leq 800) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = 0; \\ K_2 = 0; \\ K_3 = K_d; \\ K_4 = 1 - K_d; \\ K_5 = 0. \end{cases} \quad (54)$$

$$(800 < d_h \leq 900) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = 0; \\ K_2 = 0; \\ K_3 = 1 - K_d; \\ K_4 = K_d; \\ K_5 = 0 \end{cases} \quad (55)$$

$$(900 < d_h \leq 950) \Rightarrow \begin{cases} K_1 = 0; \\ K_2 = 0; \\ K_3 = 0; \\ K_4 = 0; \\ K_5 = 1; \end{cases} \quad (56)$$

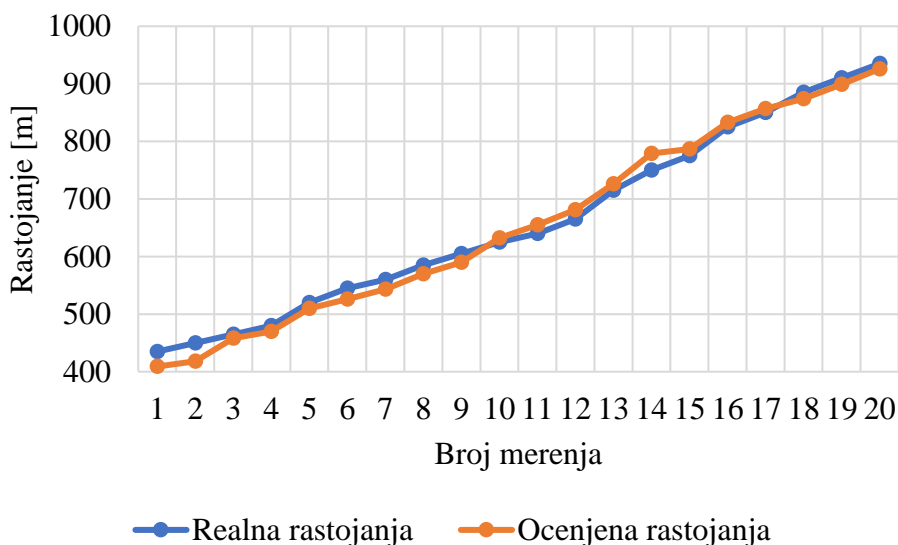
Nakon toga, elementi vektora  $\mathbf{K}$  i inverzne matrice su korišćeni za ocenu novog (popravljenog) rastojanja od sistema mašinske vizije do prethodno detektovanog objekta, odnosno do sredine BB, prema sledećem izrazu ( $x'$  i  $y'$  su koordinate na slici):

$$\begin{aligned} \text{popravljeno } d_h = & K_1 \cdot \mathbf{H}_{400-600}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} + K_2 \cdot \mathbf{H}_{500-700}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} + \\ & K_3 \cdot \mathbf{H}_{600-800}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} + K_4 \cdot \mathbf{H}_{700-900}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} + K_5 \cdot \mathbf{H}_{800-950}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (57)$$

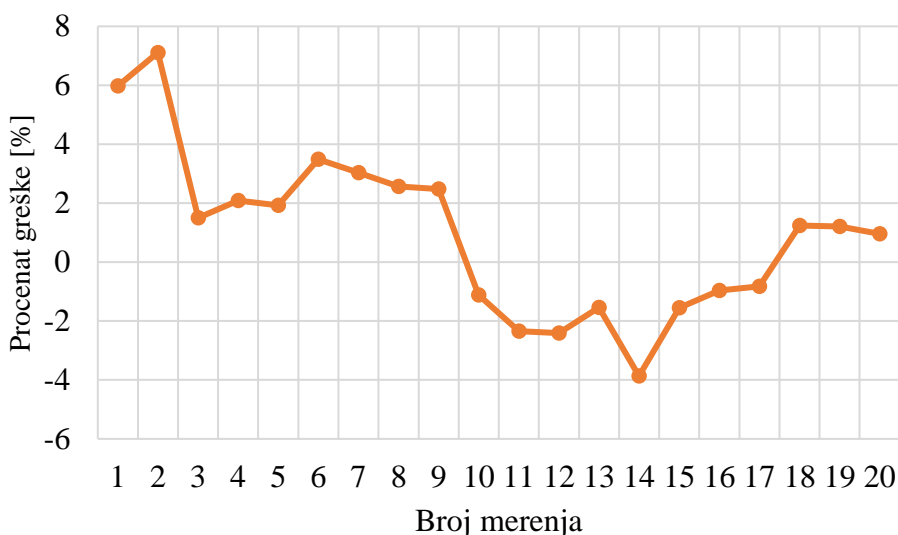
Evaluacija razvijenog hibridnog FuzzyH sistema je izvršena na setu od 20 scenarija snimljenim termovizijskom kamerom na lokaciji Babin Potok. Navedeni set je korišćen i pri prethodno opisanoj oceni rastojanja homografijom i izvršeno je poređenje izmerenih realnih i ocenjenih rastojanja. U tabeli 5.6, prikazani su rezultati ocene rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta u ROI, korišćenjem hibridnog FuzzyH sistema u opsegu od 400 do 950 metara. Na dijagramu prikazanom na slici 5.20, uporedno su prikazana realno izmerena i ocenjena rastojanja, a na dijagramu prikazanom na slici 5.21, greška ocene rastojanja za svako merenje.

**Tabela 5.6** Rezultati ocene rastojanja FuzzyH sistemom u opsegu 400 – 950 m -  
Lokacija Babin Potok

<b>Broj merenja</b>	<b>Izmereno realno rastojanje [m]</b>	<b>Rastojanje ocenjeno FuzzyH sistemom [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [%]</b>
1.	435	409	26	5,98
2.	450	418	32	7,11
3.	465	458	7	1,5
4.	480	470	10	2,08
5.	520	510	10	1,92
6.	545	526	19	3,49
7.	560	543	17	3,04
8.	585	570	15	2,56
9.	605	590	15	2,48
10.	625	632	-7	-1,12
11.	640	655	-15	-2,34
12.	665	681	-16	-2,41
13.	715	726	-11	-1,53
14.	750	779	-29	-3,87
15.	775	787	-12	-1,55
16.	825	833	-8	-0,97
17.	850	857	-7	-0,82
18.	885	874	11	1,24
19.	910	899	11	1,21
20.	935	926	9	0,96

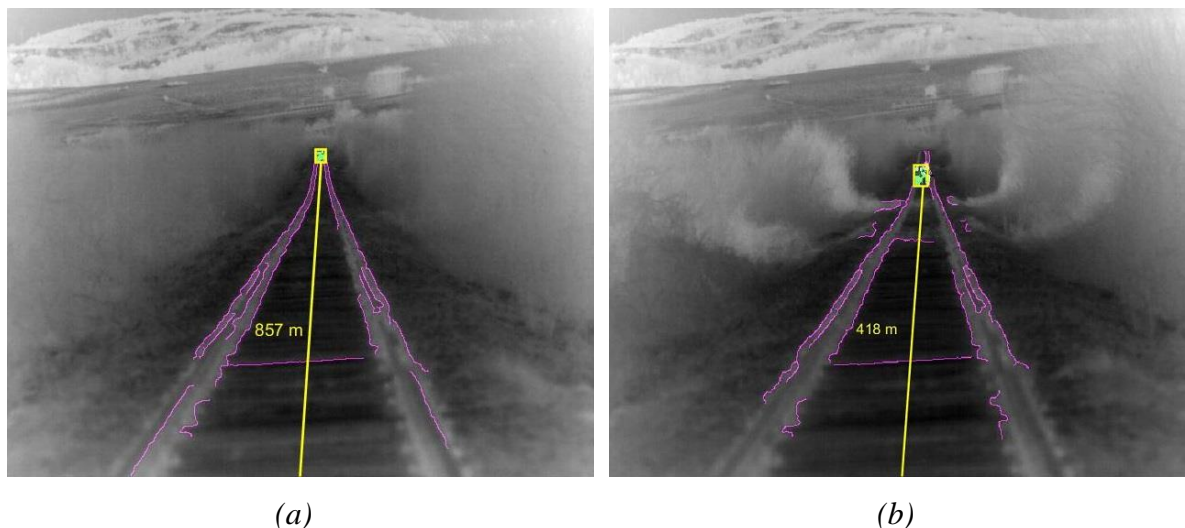


Slika 5.20 Poređenje realnih i rastojanja ocenjenih FuzzyH sistemom



Slika 5.21 Greška ocene rastojanja FuzzyH sistemom

Na osnovu rezultata, može se uočiti da je najveća greška ocene rastojanja 7,11 %, a apsolutna vrednost najmanje greške ocene čak manja od 1 %, odnosno 0,82 %, što pokazuje da, u ovom setu scenarija, FuzzyH sistem vrši ocenu rastojanja sa većom tačnošću, u odnosu na homografiju. Ipak, tačnost ocene značajno zavisi i od ocenjenog rastojanja  $d_h$ , kao jedne od ulaznih promenljivih u fazi logički sistem, kao i kvaliteta detekcije objekata. Na slici 5.22 (a) i (b), prikazani su rezultati sa najmanjom i najvećom greškom ocene rastojanja. Međutim, FuzzyH sistem nije testiran za ocenu rastojanja kod sistema noćne vizije, zbog toga što detekcija objekata nije izvršena na većim rastojanjima.



*Slika 5.22 Ocena rastojanja na lokaciji Babin Potok: najmanja (a) i najveća greška ocene (b)*

#### 5.4. Ocena rastojanja primenom veštačke neuronske mreže

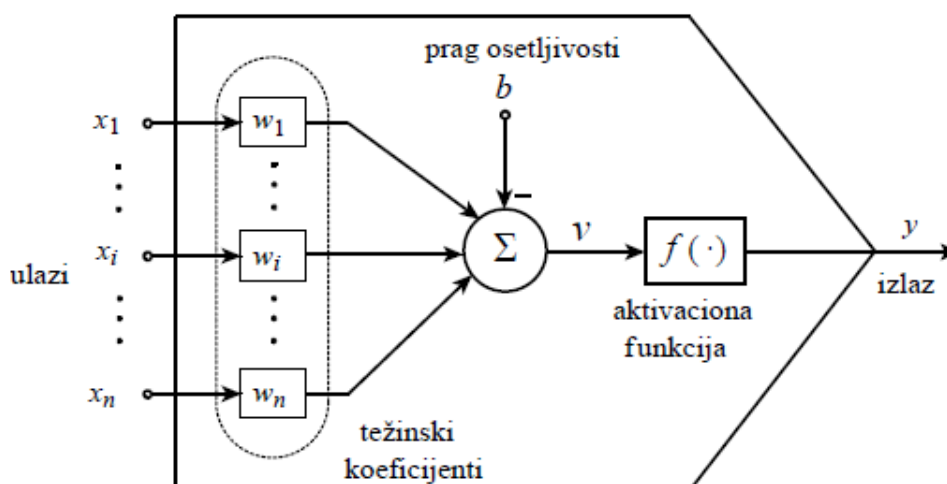
Čovek, kao najviši stepen razvoja živih bića, je veoma često poslužio kao uzor razvoju mnogih sistema i mašina. Organizam čoveka, sa svim svojim delovima je od davnina bio inspiracija prilikom kreiranja konstrukcije, principa funkcionisanja, a zatim i upravljanja mašina. Tako su nervni sistem čoveka, odnosno biološke neuronske mreže, najčešći uzor za realizaciju veštačkih neuronskih mreža (engl. *Artificial Neural Network - ANN*). Iako je ljudski mozak, kao deo centralnog nervnog sistema čoveka, i dalje nedovoljno istražen, dosadašnja osnovna znanja o strukturi i načinu njegovog rada, načinu prenosa impulsa i memorisanje, kao i njegova povezanost sa drugim delovima ljudskog tela, su upotrebljena kako bi se kreirala veštačka neuronska mreža.

Veštačke neuronske mreže, drugačije nazvane neuronske mreže, jesu sistemi veštačke inteligencije koji su sposobni da iz dostupnih podataka „uče” i, na osnovu stečenog znanja, donose određene odluke, vrše predikciju, prepoznaju i klasifikuju slike i glasove, upravljaju sistemima i rešavaju optimizacione, aproksimacione i druge vrlo softicirane probleme u različitim oblastima [276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285]. Iako su veštačke neuronske mreže po strukturi, funkciji i obradi informacija veoma slične biološkim neuronskim mrežama, treba jasno istaknuti da su to ipak veštačke tvorevine [276]. Struktura veštačkih neuronskih mreža se zasniva na skupu velikog broja međusobno povezanih jedinica, veštačkih neurona [283]. Prvi matematički model neurona je predstavljen 1943. godine od strane autora McCulloch i Pitts [283]. Većina njihovog rada podrazumevala je jednostavan model neurona i

ovi mrežni sistemi su uopšteno nazvani perceptroni. Neuron ima svoje ulaze i svoj izlaz, analogno biološkim neuronima čiji su ulazi dendriti a izlaz akson. Putem ulaza, neuron dobija ulazne signale od drugih neurona ili okruženja i obrađuje ih koristeći aktivacionu funkciju, kako bi generisao izlazni signal, koji predstavlja funkciju ulaznih signala, težinskih koeficijenata, praga osetljivosti i aktivacione funkcije (Slika 5.23). Izlazni signal se dalje vodi na druge neurone ili u spoljašnu okolinu i određen je relacijom (58) [286]. Neuroni su organizovani po slojevima, pri čemu sloj jeste grupa neurona koja prima veze od istih neurona, a neuroni unutar sloja nisu povezani.

$$y_i = f(v_i), \quad v_i = \sum_{j=1}^n w_{ij}x_j + b_i \quad (58)$$

gde su  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ulazni signali,  $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$  su sinaptičke težine  $i$ -tog neurona,  $b_i$  je prag osetljivosti (bias),  $v_i$  je aktivaciona vrednosti  $i$ -tog neurona i  $y_i$  je izlazni signal neurona.

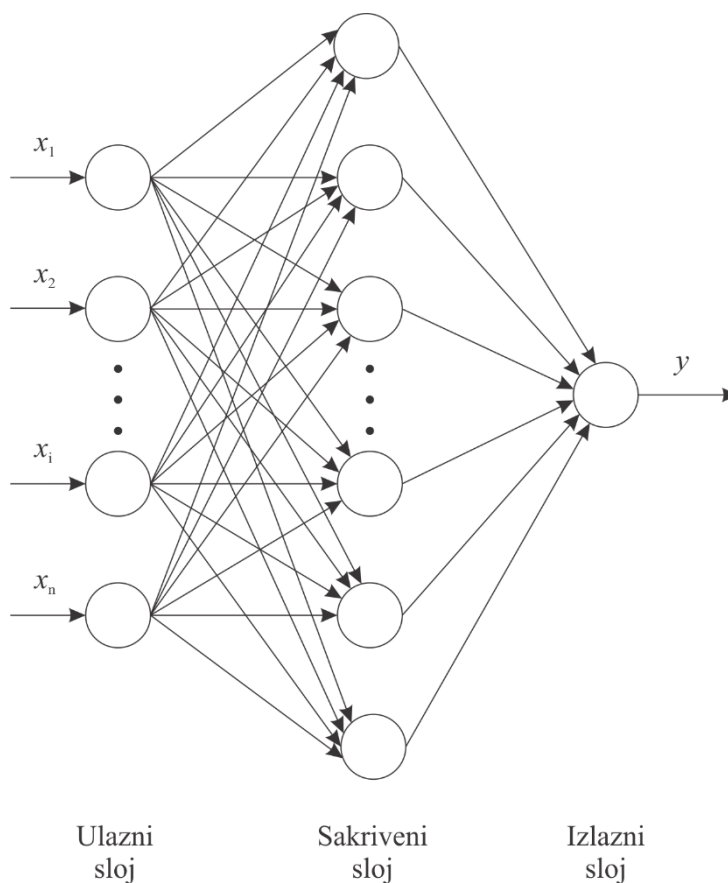


Slika 5.23 Model neurona [286]

Jedna od podela veštačkih neuronskih mreža je prema smeru prostiranja informacija, pa mogu biti: sa smerom prostiranja unapred – feedforward neuronske mreže, i sa smerom prostiranja unazad – povratne, odnosno rekurentne neuronske mreže [276]. Višeslojni perceptron (engl. *Multi-Layer Perceptron – MLP*) je klasa feedforward neuronskih mreža, koji se sastoji od više slojeva neurona, odnosno od ulaznog sloja, jednog ili više sakrivenih slojeva i izlaznog sloja (Slika 5.24). Kod ove neuronske mreže, ulazni sloj ne prima bilo kakve veze od drugih neurona, već samo iz okoline. Ulazni sloj je povezan sa sakrivenim slojem, a zatim je poslednji sakriveni sloj (ako ima više sakrivenih slojeva), povezan sa izlaznim slojem. Smer prostiranja signala je od prvog (ulaznog) do poslednjeg (izlaznog) sloja. Stoga, izlaz se izračunava u procesu propagacije ili prostiranja unapred (engl. *forward propagation*) kroz tri



koraka: kopiranje ulaza mreže u aktivaciju ulaznih jedinica, sakriveni slojevi izračunavaju svoje aktivacije topološkim redom i izlazni sloj izračunava svoju aktivaciju i kopira je u izlaz mreže. Sa druge strane, kod rekurentnih neuronskih mreža, konkretno kod Hopfield-ove neuronske mreže, izlazni neuroni su povezani sa svim ulaznim neuronima osim sopstvenog, čime svaki od neurona svojim stanjem direktno utiče na sve ostale neurone u neuronskoj mreži [276].



**Slika 5.24** MLP neuronska mreža

Proces obučavanja neuronske mreže se zasniva na modifikaciji težinskih koeficijenata kako bi vrednost izlaza mreže postala dovoljno bliska željenoj vrednosti. Konkretno, kod MLP neuronske mreže postoje više algoritama za učenje, od kojih je algoritam sa povratnim prostiranjem greške („backpropagation” algoritam), najpopularniji [276]. Ovaj algoritam predstavlja iterativnu metodu obučavanja sa nadzorom, i namenjen je za MLP mreže sa diferencijalnom nelinearnom aktivacionom funkcijom [286]. Iteracijama se minimizuje kvadrat greške izlaza mreže, odnosno kvadrat razlike između željenih i stvarnih trenutnih izlaza mreže. Obučavanje putem navedenog algoritma vrši se korišćenjem serije podataka (serije primera) gde je za svaki vektor ulaza, poznat vektor izlaza, odnosno formiraju se parovi (ulaz,

izlaz), koji pripadaju seriji podataka. Funkcija greške koju ovaj algoritam minimizira je data izrazom [286]:

$$E = \frac{1}{2} \sum_j \sum_k (y_{jk} - \hat{y}_{jk})^2, \quad (59)$$

gde je  $j$  indeks primera,  $k$  je indeks elemenata u vektoru izlaza mreže,  $y_k$  je  $k$ -ti element  $j$ -tog željenog vektora primera,  $\hat{y}_{jk}$  je  $k$ -ti element vektora izlaza koji se dobija kada se primer  $j$  dovede na ulaz mreže. Parovi primera iz serije se koriste za obučavanje, kroz tri koraka [276]:

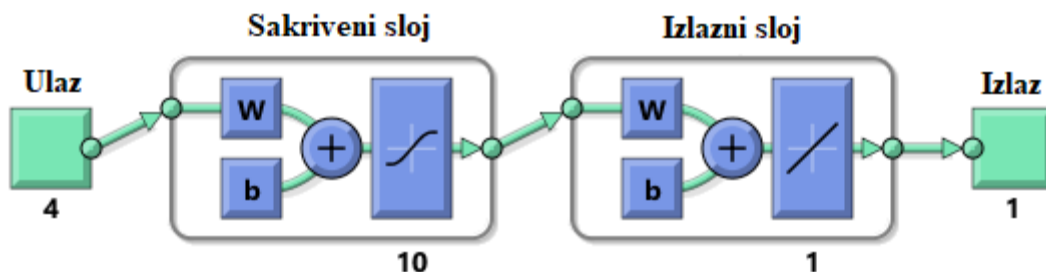
1. Na ulaze mreže se vrši unošenje ulaznog vektora i pokretanje mreže, čime se izračunavaju aktivacione funkcije sekvencijalno unapred od prvog sakrivenog do izlaznog sloja.
2. Za taj primer (par podataka) se vrši izračunavanje razlike između željenog i stvarnog trenutnog izlaza mreže, a zatim se greška sekvencijalno prostire unazad od izlaznog do prvog sakrivenog sloja.
3. Težine se, proporcionalno sa greškom, modifikuju za svaku vezu.

Realizacijom sva tri koraka za svaki primer nastaje jedna epoha. Obučavanje mreže može trajati određeni broj epoha, a najčešći broj epoha je hiljadu. Zaustavljanje obučavanja nastupa kada se dostigne određeni broj epoha ili kada greška izlaza bude ispod određene (prihvatljive) granice [276].

Iako je veštačka neuronska mreža napravljena po ugledu na ljudski mozak, postoje neke značajne razlike u pogledu njihovih karakteristika. Naime, neuron u mozgu radi brzinom od 100 Hz, što je, u poređenju sa izvršavanjem zadataka računara, relativno sporo [276]. Međutim, za razliku od računara, prirodni neuroni vrše paralelnu obradu signala, što je, ukupno gledano, neuporedivo brže u odnosu na računar. Sa druge strane, čoveku je sasvim normalno da veoma lako realizuje zadatke prepoznavanja objekata, glasova, lica, itd., dok to nije slučaj kod veštačke neuronske mreže, upravo zbog paralelne obrade signala. Ipak, prednost veštačke neuronske mreže je to što nije potrebno definisati vezu između ulaza i izlaza, jer se te veze određuju u procesu učenja. Takođe, obučavanje veštačke neuronske mreže je neuporedivo brže u odnosu na biološku, koje može trajati godinama. Iako postoje značajne razlike, glavne karakteristike koje se smatraju i opisuju kao zajedničke funkcije u biološkim i veštačkim neuronskim mrežama su: učenje i adaptacija, generalizacija, masovni paralelizam, robustnost, asocijativno skladištenje informacija i prostorno-vremenska obrada informacija [283].

U okviru istraživanja, za potrebe ocene velikih rastojanja između sistema mašinske vizije i detektovanog objekta, kreirana je feedforward neuronska mreža sa povratnim

prostiranjem greške („backpropagation” algoritam). Ova mreža sadrži četiri ulaza i jedan izlaz, pri čemu poseduje jedan sakriveni sloj sa deset neurona (Slika 5.25). Zbog svoje jednostavnosti i brzine obrade podataka, ovakva mreža je u IT krugovima poznata kao „vanila neuronska mreža”.



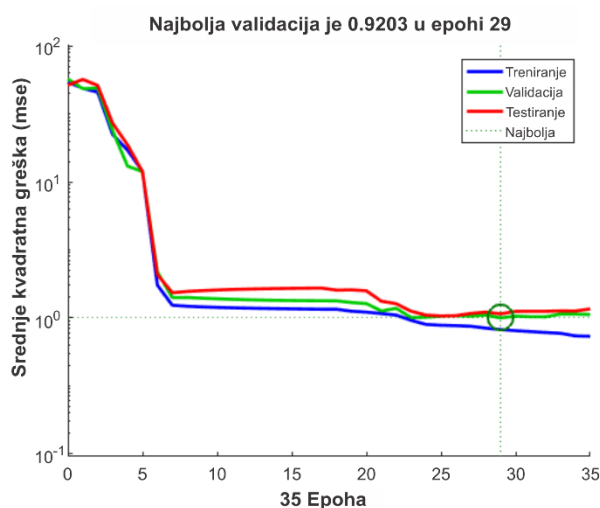
Slika 5.25 Veštačka neuronska mreža za ocenu rastojanja

Za potrebe obučavanja (treniranja) ove mreže, korišćeni su podaci prikupljeni u okviru eksperimenta na lokaciji Babin Potok na opsegu rastojanja objekata od 400 do 950 metara, izmereno od sistema mašinske vizije. Na ovom opsegu je, pre eksperimenta, izvršeno merenje i obeležavanje rastojanja na svakih 10 metara. Dakle, na navedenom opsegu rastojanja, tri člana SMART projektnog tima su se kretala signalizirajući svoju poziciju na svakih 10 metara (ilustrovano belim krugovima na slici 5.26). Na taj način je kreiran trening skup od ukupno 168 parova podataka.

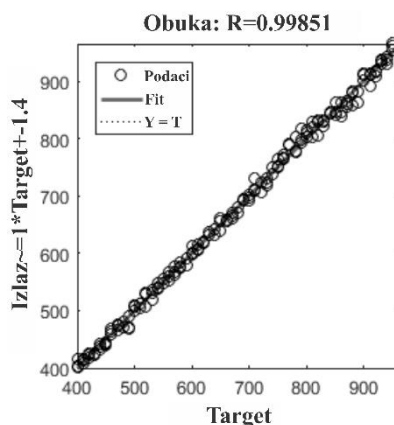


Slika 5.26 Ilustracija pozicija termovizijske kamere i objekata na koloseku na opsegu rastojanja od 400 do 950 metara

Ulazi u kreiranu mrežu su visina, širina, i  $x$  i  $y$  koordinate stopala objekta, a izlaz iz mreže je izmereno realno rastojanje tog objekta od sistema mašinske vizije. Vrednosti ulaza su očitavani sa termovizijskih slika, dok su vrednosti izlaza bili poznati, jer su članovi tima u toku eksperimenta signalizirali svoju poziciju. Aktivacione funkcije su hiperboličke tangensne sigmoidne funkcije (tansig) u sakrivenom i izlaznom sloju, jer je, u poređenju sa ostalim, ova kombinacija (tansig, tansig) pokazala najbolje rezultate, sagledavajući brzinu konvergencije i meru performansi (korišćena je srednje kvadratna greška (MSE)). Za obučavanje mreže je korišćen Levenberg-Marqdt-ov algoritam, jer ga karakterišu dovoljna brzina i pouzdanost za učenje. Slučajnim odabirom je izabrano 70% podataka za obučavanje, 15% podataka za testiranje i 15% podataka za validaciju. Prikaz mere performansi je dat na slici 5.27, a stanje izlaza kod učenja je prikazano na slici 5.28.



Slika 5.27 Mera performansi veštačke neuronske mreže

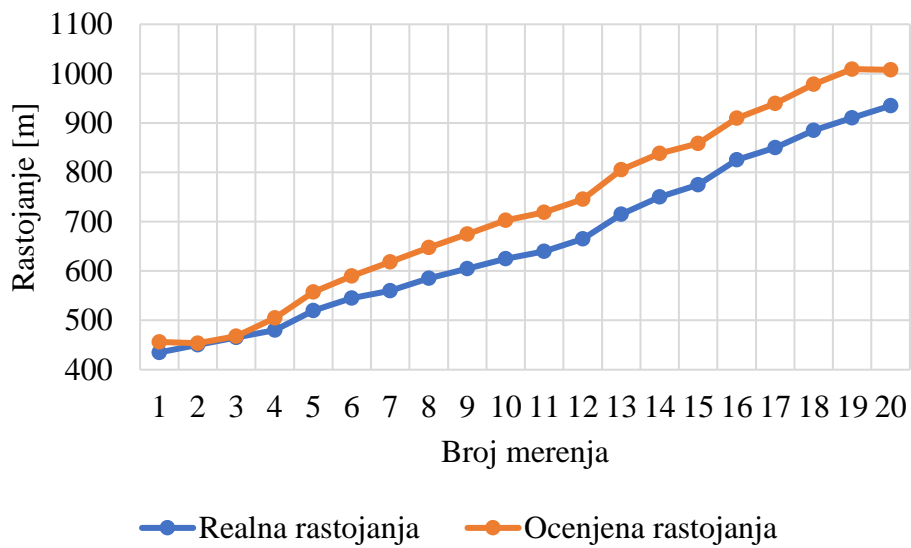


Slika 5.28 Stanje izlaza kod učenja veštačke neuronske mreže

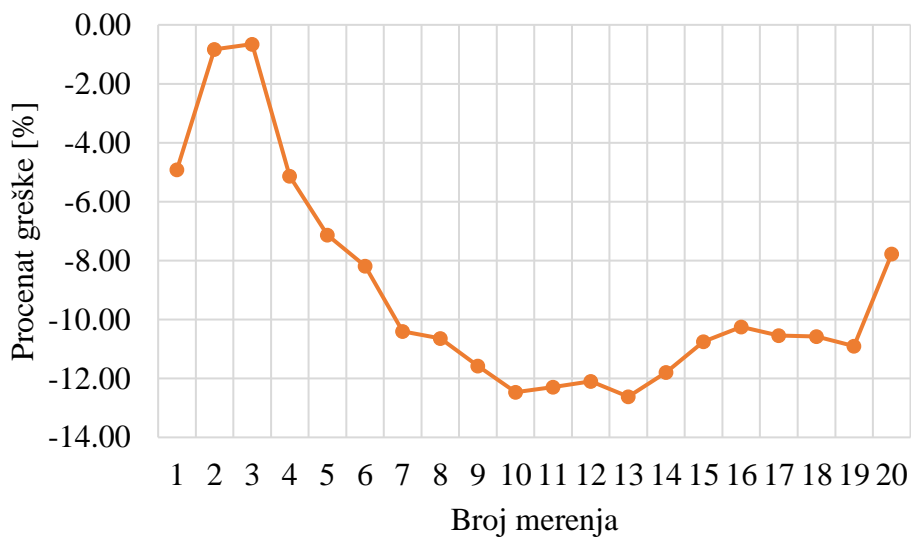
Provera rada mreže je izvršena korišćenjem skupa od 20 podataka o ulazima, za koje je izvršena ocena rastojanja veštačkom neuronskom mrežom i upoređena sa poznatim izmerenim realnim rastojanjima. Rezultati ocene rastojanja su prikazani u tabeli 5.7. Na dijagramu na slici 5.29, su uporedno prikazana realno izmerena i ocenjena rastojanja, a na dijagramu na slici 5.30, greška ocene rastojanja za svako merenje.

**Tabela 5.7** Rezultati ocene rastojanja veštačkom neuronskom mrežom u opsegu 400 – 950 m  
- Lokacija Babin Potok

<b>Broj merenja</b>	<b>Izmereno realno rastojanje [m]</b>	<b>Rastojanje ocenjeno veštačkom neuronskom mrežom [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [m]</b>	<b>Greška ocene rastojanja [%]</b>
1.	435	456	-21	-4,91
2.	450	454	-4	-0,83
3.	465	468	-3	-0,65
4.	480	505	-25	-5,13
5.	520	557	-37	-7,13
6.	545	590	-45	-8,19
7.	560	618	-58	-10,40
8.	585	647	-62	-10,64
9.	605	675	-70	-11,58
10.	625	703	-78	-12,46
11.	640	719	-79	-12,29
12.	665	745	-80	-12,10
13.	715	805	-90	-12,62
14.	750	838	-88	-11,80
15.	775	858	-83	-10,76
16.	825	910	-85	-10,25
17.	850	940	-90	-10,55
18.	885	979	-94	-10,58
19.	910	1009	-99	-10,90
20.	935	1008	-73	-7,77



Slika 5.29 Poređenje realnih i rastojanja ocenjenih veštačkom neuronskom mrežom



Slika 5.30 Greška ocene rastojanja veštačkom neuronskom mrežom

Rezultati ocene rastojanja veštačkom neuronskom mrežom pokazuju da je apsolutna vrednost najveće greške ocene rastojanja 12.62 %, dok je apsolutna vrednost najmanje greške ocene 0.65 %. Međutim, analizirajući ulazne parametre i rezultate ocene, može se primetiti da greška raste sa porastom rastojanja što je, kao i kod ostalih metoda, posledica segmentacije slike u koraku detekcije objekata. Pored toga, na obučavanje neuronske mreže utiče i nedostatak većeg broja podataka za obučavanje, kao i još sakrivenih slojeva ili veći broj neurona. S obzirom na sve navedeno, može se zaključiti da je kreirana veštačka neuronska mreža sa zadovoljavajućom tačnošću izvršila ocenu rastojanja. Međutim, rad ove mreže nije

testiran za ocenu rastojanja kod sistema noćne vizije, zbog nedovoljnog broja podataka za obučavanje.

## 5.5. Uporedna analiza rezultata ocene rastojanja

Ocena rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta na opsegu od 400 do 950 metara je vršena primenom tri metode: homografija, FuzzyH sistem i veštačka neuronska mreža. Navedene metode su korišćene na termovizijskim slikama za isti set podataka, koji je dobijen u okviru eksperimenta na lokaciji Babin Potok, a kako bi se mogla izvršiti komparativna analiza rezultata. U tabeli 5.8, dat je prikaz grešaka ocene rastojanja primenom navedene tri metode, a na slici 5.31 dijagram uporednog prikaza greške sve tri metode.

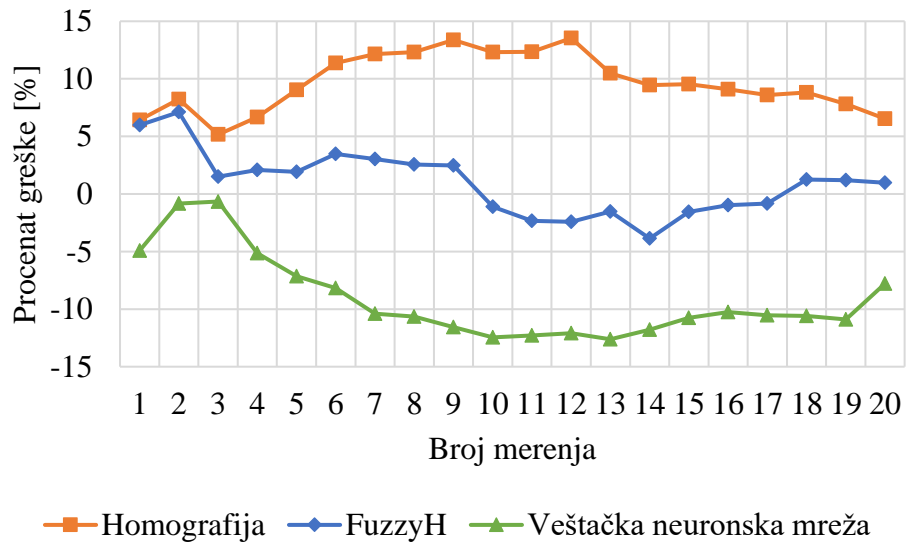
Analizom prikazanih rezultata, kod homografije se primećuje blagi porast greške sa rastom rastojanja, ali je najveća greška na sredini opsega, što ukazuje na to da homografija daje dobre rezultate ocene na krajevima intervala. Takođe, kada je homografija korišćena na kraćim rastojanjima (kod termovizije i sistema noćne vizije), pokazala je zadovoljavajuće rezultate. To ukazuje na to da je ovaj metod ne pokazuje dobre rezultate kada se matrica homografije računa korišćenjem koordinata tačaka koje su međusobno na velikim rastojanjima. Pored toga, glavni nedostatak homografije je što, u slučaju promene ravni, npr. zbog promene ugla elevacije kamere ili promene nagiba terena, potrebno je ponovno izračunavanje matrice homografije. FuzzyH sistem, svakako, pokazuje bolje rezultate ocene rastojanja od homografije, što je i bio cilj prilikom razvijanja ovog sistema. Međutim, treba naglasiti da tačnost ovog sistema zavisi i od homografije, s obzirom da je ocenjeno rastojanje homografijom jedna od ulaznih promenljivih u fazi logički sistem. Ipak, i kod ovog sistema se u kasnijem koraku vrši računanje matrica homografije što, u slučaju promene ravni, može predstavljati nedostatak. Veštačka neuronska mreža je na sredini opsega pokazala relativno veliku grešku ocene rastojanja, što jeste posledica malog broja podataka za obučavanje i korišćenja jednostavne neuronske mreže. Sa druge strane, brojčana vrednost najveće greške ocene rastojanja nije previše velika, uzimajući u obzir na kom realnom izmerenom rastojanju se pojavila. Ipak, tačnost mreže bi se mogla povećati obučavanjem skupom od više podataka, kao i eventualnom izmenom same mreže kroz dodavanje još sakrivenih slojeva ili većeg broja neurona. Svakako, jedna od karakteristika navedenih metoda je i zavisnost njihove tačnosti od kvaliteta detekcije objekata. Sa druge strane, performanse kamera i uslovi u kojima su slike snimljene, imaju veliki uticaj na kvalitet slike, što se reflektuje na kvalitet detekcije objekata

jer, bez slike visokog kvaliteta, nije moguće postići kvalitetnu i tačnu detekciju objekata, što ima za posledicu i pojavu greške ocene rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta.

*Tabela 5.8 Greške ocene rastojanja primenom tri metode*

<b>Broj merenja</b>	<b>Homografija [m]</b>	<b>Homografija [%]</b>	<b>FuzzyH sistem [m]</b>	<b>FuzzyH sistem [%]</b>	<b>Veštačka neuronska mreža [m]</b>	<b>Veštačka neuronska mreža [%]</b>
1.	28	6,44	26	5,98	-21	-4.91
2.	37	8,22	32	7,11	-4	-0.83
3.	24	5,16	7	1,5	-3	-0.65
4.	32	6,67	10	2,08	-25	-5.13
5.	47	9,04	10	1,92	-37	-7.13
6.	62	11,38	19	3,49	-45	-8.19
7.	68	12,14	17	3,04	-58	-10.40
8.	72	12,31	15	2,56	-62	-10.64
9.	81	13,39	15	2,48	-70	-11.58
10.	77	12,32	-7	-1,12	-78	-12.46
11.	79	12,34	-15	-2,34	-79	-12.29
12.	90	13,53	-16	-2,41	-80	-12.10
13.	75	10,49	-11	-1,53	-90	-12.62
14.	71	9,47	-29	-3,87	-88	-11.80
15.	74	9,55	-12	-1,55	-83	-10.76
16.	75	9,09	-8	-0,97	-85	-10.25
17.	73	8,59	-7	-0,82	-90	-10.55
18.	78	8,81	11	1,24	-94	-10.58
19.	71	7,8	11	1,21	-99	-10.90
20.	61	6,52	9	0,96	-73	-7.77





Slika 5.31 Uporedni prikaz greške ocene rastojanja primenom tri metode

## 6. Inteligentni integrisani sistem za autonomno železničko vozilo

Automatizacija železničkog saobraćaja predstavlja važan segment u povećanju efikasnosti, kapaciteta i kvaliteta železnice. Inicijative predložene Evropskom transportnom strategijom 2011-2021 (Plan puta ka jedinstvenom evropskom saobraćajnom prostoru - ka konkurentnom i efikasnom saobraćajnom sistemu – engl. *Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system*) imaju za cilj da 30% drumskog teretnog prevoza preko 300 km prebaci na druge vidove prevoza, kao što su železnički ili vodni saobraćaj do 2030. godine, i više od 50% do 2050. godine [287]. Za postizanje takve vizije svakako je potrebno razvijanje nove infrastrukture, kao i povećanje efikasnosti i propusnosti postojeće infrastrukture.

Kako bi mogla da ponudi korisnicima ekonomičnu, fleksibilnu i atraktivnu uslugu, železnica mora da sledi trend automatizacije. Različiti nivoi autonomnosti su već prisutni u ostalim vidovima saobraćaja – autonomna drumska vozila, autopiloti u avionskom i vodnom saobraćaju, ali i „automatizovana vođena vozila” (engl. *Automated Guided Vehicles - AGV*) u magacinima, distributivnim centrima i lukama [288]. Razvoj autonomnih sistema u železnici prisutan je uglavnom u oblasti usluga javnog prevoza (metro linije bez vozača, laki železnički tranzit (engl. *light rail transit (LRT)*), i automatizovani vođeni tranzit (engl. *automated guided transit (AGT)*). Prema podacima sa početka 2018. godine, 996 km automatizovanog metroa je u funkciji, sa 62 linije koje zajedno opslužuju 41 grad u 19 zemalja. Trenutne prognoze, zasnovane na projektima odobrenim za realizaciju, pokazuju da će do 2025. godine, biti u funkciji preko 2.300 km potpuno automatizovanih linija metroa [289]. Osnovna ideja bila je upotreba određenog nivoa automatizacije kako bi se operativni zadaci prebacili sa vozača na sistem upravljanja železničkim vozilom. Autonomni vozovi su značajno efikasniji, sigurniji, jeftiniji i imaju manje zastoja nego vozovi kojima upravljaju ljudi. U Višegodišnjem akcionom planu Shift2Rail grupacije, predstavljene se brojne prednosti automatizacije teretnog železničkog saobraćaja koje uključuju prednosti u vidu kvaliteta usluge (bolja tačnost), povećanja kapaciteta (10 – 50 %), smanjenja troškova sistema (20% uštede energije), smanjenja

operativnih troškova (50% smanjenje troškova za vozače) i ukupnog povećanja efikasnosti od 10% [287, 290].

Prema standardu 62290-1 Međunarodne elektrotehničke komisije (engl. *The International Electrotechnical Commission (IEC)*), postoje četiri stepena automatizacije železničkog vozila (engl. *Grades of Automation (GoA)*). Autonomno upravljanje železničkim vozilom (engl. *Autonomous Train Operation - ATO*) predstavlja deo visoko automatizovanog sistema sa smanjenim nadzorom od strane mašinovođe (Slika 6.1) [289]. Ciljevi uvođenja ATO-a su poboljšanje kvaliteta železničkog saobraćaja u vidu tačnosti, pouzdanosti i fleksibilnosti, smanjenje operativnih troškova, maksimalna ušteda energije, povećanje transportnih kapaciteta na linijama i čvorištima evropske TEN-T mreže i doprinos viziji potpuno automatizovanog sistema za teretni saobraćaj [290].



**Slika 6.1** Nivoi automatizacije i upravljanja železničkim vozilom [289]

Ključni element autonomnog železničkog vozila predstavlja bezbedan i pouzdan sistem detekcije prepreka u različitim vremenskim uslovima i uslovima vidljivosti, a u cilju pravovremenog zaustavljanja. U okviru projekta SMART, integracijom više različitih komponenti razvijen je jedinstveni inteligentni integrisani sistem mašinske vizije za detekciju potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture, čiji su pojedini elementi predstavljeni u okviru ove doktorske disertacije.

Kako bi se postigla robustnost detekcije u različitim uslovima osvetljenja i vremenskim uslovima, razvijeni sistem objedinjuje više različitih senzora: termovizijsku kameru, sistem noćne vizije, tri RGB kamere i laserski skener. Ovi senzori su, sa pratećim komponentama,

integrirani u jedan multisenzorski sistem za detekciju potencijalnih prepreka na različitim rastojanjima u dnevnim i noćnim uslovima, odnosno u uslovima dobre i smanjene vidljivosti. Za potrebe objedinjavanja svih komponenti sistema, razvijeno je robustno kućište od nisko legiranog čelika visoke čvrstoće, koje je površinski zaštićeno postupkom plastificiranja i projektovano uzimajući u obzir njegovo korišćenje u različitim vremenskim uslovima [215]. Virtuelni 3D model sistema je prikazan na slici 6.2.



**Slika 6.2** 3D model integrisanog sistema za detekciju potencijalnih prepreka [291]

Tri monokularne RGB kamere (oznaka RGB na slici 6.5) su korišćene u dnevnim uslovima. Sve tri kamere su istog tipa DFK Z12GP031 i proizvođača The Imaging Source (Slika 6.3). Rezolucija kamere je  $2592 \times 1944$  piksela, sa 15 FPS i veličinom piksela od  $2,2 \mu\text{m}$  i poseduje mogućnost zumiranja, zbog žižne daljine od 4,8 do 57,6 mm. Dimenzije kamere su  $50 \times 50 \times 103$  mm, sa masom od 330 g. Temperaturni radni uslovi su od  $-5^\circ\text{C}$  do  $45^\circ\text{C}$ , u opsegu vlažnosti od 20 % do 80 % bez kondenzacije [292]. Kamere se nalaze u robustnom kućištu i poseduje GigE interfejs, što omogućava njihovu integraciju sa sistemom noćne vizije [215].



**Slika 6.3** RGB kamera model DFK Z12GP031 [292]

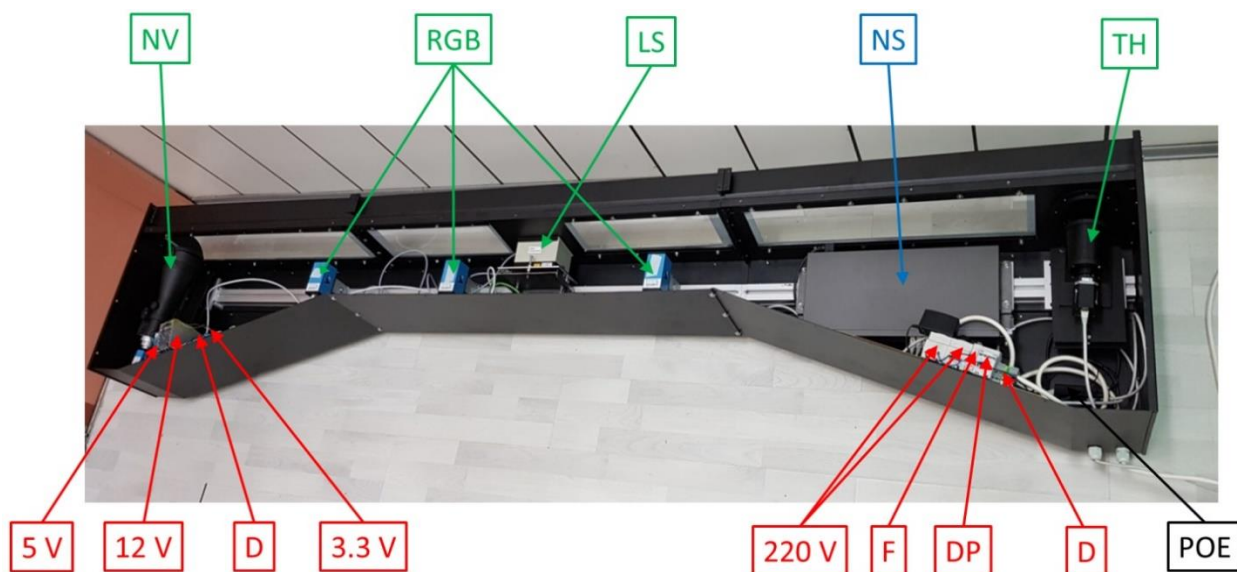
Laserski skener (oznaka LS na slici 6.5) je korišćen za tačno merenje rastojanja. Zbog svoje pouzdanosti, tačnosti i zastupljenosti u autonomnim vozilima, izabran je model LD-MRS400001S01, proizvođača SICK (Slika 6.4). Laserski skener pomaže sistemu tako što doprinosi tačnom merenju rastojanja u 3D koordinatama na osnovu tehnologije Time-of-Flight (ToF) i njegove ugrađene funkcije praćenja objekata. Višeslojna tehnologija LD-MRS

omogućava pokrivanje vertikalnog raspona sa pojedinačnim prijemnikom za svaki od 4 sloja. Opseg merenja navedenog skenera je od 0,5 do 300 metara, sa horizontalnim vidnim poljem od 110° i vertikalnim vidnim poljem od 3,2° [215]. Ugaona rezolucija je 0.125°, 0.25°, 0.5° a frekvencija skeniranja 12,5 Hz do 50 Hz, sa praćenjem objekta pri 12,5 Hz. Dimenzije laserskog skenera su 94×165×88 mm, sa masom od 1 kg [293].



Slika 6.4 Laserski skener model LD-MRS400001S01 [215]

Termovizijska kamera i sistem noćne vizije su korišćeni u noćnim uslovima, a njihov detaljan opis je dat u poglavlju tri ove doktorske disertacije. Na slici 6.5, termovizijska kamera ima oznaku TH a sistem noćne vizije ima oznaku NV. Mrežno povezivanje senzora je izvršeno pomoću mrežnog uređaja (switch-a) NETGEAR XS708T (oznaka NS na slici 6.5), korišćenjem CAT7 Ethernet kablova odgovarajuće dužine. Sa druge strane, mrežni uređaj je povezan CAT7 Ethernet kablom sa PC računarnom radi prikupljanja i obrade podataka u realnom vremenu. Dodatne komponente koje su korišćene su različite vrste napajanja (označeno crvenom bojom na slici 6.5) i PoE (Power of Ethernet) uređaj (oznaka POE na slici 6.5).



Slika 6.5 Elementi integrisanog sistema za detekciju potencijalnih prepreka

PC računar poseduje matičnu ploču ASUS RAMPAGE VI EXTREME, sa procesorom INTEL Core i9-7900X, RAM memorijom KINGSTON DIMM DDR4 32GB, dve grafičke kartice ROG Strix GeForce GTX 1080 Ti OC edition 11GB GDDR5X, hard diskom HDD SSD M.2 NVMe Samsung 500GB 960 Pro, u kućištu MasterCase H500P, sa napajanjem LC Power LC1000 v2.4 80 plus Platinum i hlađenjem COOLER MASTER MasterLiquid ML240L. Na PC računaru je instaliran operativni sistem Ubuntu 14.04 64-bit sa softverima: ROS Indigo Igloo Full Desktop, Qt 4.8.1, CUDA 8.1, OPEN CV i Team Viewer 13.

Za potrebe eksperimenata koji su prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji, sistem je postavljan na odgovarajuće nosače, kako bi mogla da se podesi tačna visina u odnosu na kolosek (Slika 6.6). U okviru eksperimenata korišćeni su generator električne energije, ali i stabilizator napona i UPS uređaji, kako bi se komponente zaštitile od eventualnih varijacija električne struje i napona. Da bi se sve komponente sistema zaštitile od spoljašnjih uticaja, a da to ne utiče na njihovu funkcionalnost i rad, postavljena su ravna kaljena zaštitna stakla. Ispred termovizijske kamere je postavljeno zaštitno staklo od germanijuma, koje propušta infracrveno zračenje. Laserski skener poseduje robustno zaštitno kućište, tako da nije bilo potrebno postavljati dodatne elemente zaštite. Na vrhu kućišta se nalaze elementi za dovođenje spoljašnjeg vazduha do zaštitnih stakala koje, poput mlaznica, povećavaju protok vazduha koji, u lošim vremenskim uslovima npr. kiša i sneg, uklanja čestice vode sa površina zaštitnih stakala. Ukupna masa kućišta sa svim komponentama je oko 90 kg [215].



*Slika 6.6* Integrisani sistem za detekciju potencijalnih prepreka postavljen na terenu



Prikazani sistem je projektovan tako da može da se izvrši njegova montaža na lokomotivu Srbija Kargo ŽS serije 444. Pored napred navedenih komponenti, sistem poseduje dodatnu konstrukciju (na koju se postavlja kućište) za montažu na lokomotivu, dodatni balast za povećanje ukupne mase, troosni senzor ubrzanja i četiri gumeno-metalna elementa Trelleborg M50 za smanjenje vibracija. Ovakav sistem je, u okviru istraživanja na SMART projektu, uz dozvolu nadležnog preduzeća „Srbija Kargo a.d.“, montiran na lokomotivu, radi realizacije dinamičkih eksperimenata. Ovi eksperimenti su, uz dozvolu nadležnog preduzeća „Infrastruktura železnice Srbije a.d.“, realizovani na dve relacije: Železnička stanica Crveni Krst-Ranžirna stanica Popovac, na kojoj je samo lokomotiva sa montiranim sistemom prešla dužinu od 3,1 km, i Ranžirna stanica Popovac-Železnička stanica Preševo, kao kompletna teretna kompozicija. Međutim, dinamički eksperimenti nisu bili predmet istraživanja ove doktorske disertacije.

## **7. Zaključak**

Potreba za stalnim razvojem i unapređenjem železničkog saobraćaja zahteva određeni vid automatizacije kako bi se povećali kapaciteti, poboljšala efikasnost i kvalitet usluga. Sa druge strane, u svakodnevnom železničkom saobraćaju, prisutni su mnogi bezbednosni izazovi koji mogu imati značajan uticaj na njegovo redovno funkcionisanje. Jedan od izazova je postojanje objekta na delu železničke infrastrukture, odnosno koloseku, koji mogu dovesti do usporavanja ili zaustavljanja železničkog saobraćaja, ili čak do saobraćajne nezgode.

Osnovni rezultat istraživanja i naučni doprinos ove doktorske disertacije je razvijeni inteligentni sistem mašinske vizije kao ključni element autonomnog železničkog vozila. Zadatak ovog sistema je detekcija potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture u uslovima smanjene vidljivosti. U cilju razvoja pouzdanog i robustnog sistema izvršena je analiza različitih algoritama za detekciju objekata u oblasti inteligentnih transportnih sistema, autonomnih vozila i železnice. Pored toga, kroz niz eksperimenata na četiri različite lokacije, izvršena je analiza terena i uslova vidljivosti u kojima treba vršiti detekciju, kao i mogućnosti korišćenja termovizijske kamere i sistema noćne vizije. Zbog različitih okruženja i količine svetlosti na železničkoj infrastrukturi, lokacije su izabrane tako da su obuhvaćeni: gusto naseljeni deo grada, industrijska zona grada i ruralno područje.

Rezultat istraživanja i naučni doprinos su takođe i razvijeni napredni algoritam za obradu slike, koji je spregnut sa termovizijskom kamerom i sistemom noćne vizije. S obzirom da nije svaki objekat u sceni potencijalna prepreka, bilo je neophodno izvršiti određivanje regiona od interesa u kome će se vršiti detekcija, a zatim i samu detekciju. Rad algoritma je testiran sa tri različite termovizijske kamere i jednim sistemom noćne vizije, na navedenim lokacijama i to kroz niz eksperimenata na terenu u različitim godišnjim dobima, vremenskim uslovima i uslovima vidljivosti. Za potrebe testiranja, osmišljeni su i realizovani realni scenariji na terenu sa i bez prisustva objekata-ljudi. Rezultati eksperimenata su pokazali da se termovizijska kamera i sistem noćne vizije, spregnuti sa razvijenim algoritmom mogu koristiti za detekciju potencijalnih prepreka na delu železničke infrastrukture, ali kvalitet detekcije značajno zavisi od kvaliteta snimljene slike, što je posledica veoma otežanih uslova na terenu





i performansi kamera. Implementacijom genetskog algoritma, kao tehnike veštačke inteligencije, algoritam je unapređen i postignuta je tačnija detekcija koloseka, što značajno utiče na tačnije određivanje regiona od interesa.

Ocena rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta predstavlja rezultat istraživanja i naučni doprinos ove doktorske disertacije. Testirane su tri metode ocene rastojanja na realnim scenarijima, realizovanih na terenu. Metoda homografije je testirana na dve različite lokacije, u različitim opsezima rastojanja, na termovizijskom sistemu i sistemu noćne vizije. U cilju tačnije ocene rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta na većim rastojanjima, razvijena je FuzzyH metoda koja integriše metodu homografije i fazi logiku. Takođe, za potrebe ocene velikih rastojanja, razvijena je veštačka neuronska mreža sa četiri ulaza i jednim izlazom. Rad FuzzyH metode i veštačke neuronske mreže je testiran na realnim scenarijima u opsegu od 400 do 950 metara. Kako bi se izvršila uporedna analiza rezultata ocene rastojanja, sve tri metode su testirane na setu termovizijskih slika snimljenim na terenu u realnim uslovima, i to za isti set podataka. Ova analiza je pokazala prednosti i mane svake metode, ali i veliku zavisnost tačnosti ocene rastojanja od kvaliteta detekcije objekata, što svakako zavisi od performansi kamera i uslova u kojima su slike snimljene. U uslovima stalne težnje za unapređenjem bezbednosti i kvaliteta železničkog saobraćaja, celokupni sistem predstavljen u ovoj doktorskoj disertaciji i njegova primena ima značajan doprinos u daljem razvoju železničkog saobraćaja.

Dalja istraživanja će biti usmerena na unapređenje i optimizaciju algoritma za detekciju potencijalnih prepreka na železničkoj infrastrukturi kroz njegovo poboljšanje i implementaciju metoda veštačke inteligencije i mašinskog učenja. Kao jedan od važnih elemenata mašinske vizije, a uzimajući u obzir značajan doprinos bezbednosti železničkog saobraćaja, biće razvijen i implementiran klasifikator detektovanih objekata. Rad algoritma će biti testiran u realnim uslovima na terenu i to u različitim uslovima osvetljenja i vremenskim uslovima, na više različitih lokacija.

Jedan od pravaca daljih istraživanja biće fuzija slika sa termovizijske kamere i sistema noćne vizije. Na ovaj način se vrši objedinjavanje rezultata rada pojedinačnih sistema, podiže kvalitet i povećava tačnost detekcije. Takođe, daljim istraživanjima će biti obuhvaćeno prikupljanje podataka sa terena i razvoj novog algoritma za detekciju potencijalnih prepreka i njegovo testiranje u različitim uslovima na više lokacija.

U okviru daljih istraživanja, vršiće se unapređenje razvijenih metoda za ocenu rastojanja od sistema mašinske vizije do detektovanog objekta, kroz implementaciju metoda



veštačke inteligencije, kao i razvoj novih metoda ocene rastojanja. Ova komponenta predstavlja veoma važan deo autonomnog upravljanja železničkim vozilom, jer ima značajan uticaj na njegov zaustavni put, što svakako doprinosi povećanju bezbednosti i kvaliteta železničkog saobraćaja.

## 8. Literatura

- [1] *Pravilnik o načinu ukrštanja železničke pruge i puta, pešačke ili biciklističke staze, mestu na kojem se ne može izvesti ukrštanje merama za osiguranje bezbednog saobraćaja*, Sl. glasnik RS, br. 89/2016.
- [2] Izveštaj o bezbednosti na putnim prelazima u 2019. godini: Najviši nivo u protekle dve decenije, [Na mreži]. Available: <https://infrazs.rs/2020/01/izvestaj-o-bezbednosti-na-putnim-prelazima-u-2019-godini-najvisi-nivo-u-protekle-dve-decenije/>. [Poslednji pristup 28 6 2020].
- [3] *Republika Srbija, Republički zavod za statistiku, Bilten Saobraćaj i telekomunikacije u Republici Srbiji, 2018*, Beograd, Republika Srbija, 2019.
- [4] E. R. DAVIES, *Machine vision theory, algorithms, practicalities* 4th Edition, Waltham, USA: Elsevier, 2012.
- [5] I. Bekerman, P. Gottlieb i M. Vaiman, „Variations in Eyeball Diameters of the Healthy Adults,“ *Journal of Ophthalmology*, t. 2014, 2014.
- [6] [Na mreži]. Available: <http://profilens.com/services/ljudsko-oko/> , pristupljeno 21.11.2019. godine.
- [7] [Na mreži]. Available: <http://www.laserfocus.eu/ljudsko-oko/> , pristupljeno 21.11.2019. godine.
- [8] T. Acharya i A. K. Ray, *Image processing : principles and applications*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [9] A. Hornberg, *Handbook of Machine and Computer Vision*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017.
- [10] N. Zuech, *Understanding and Applying Machine Vision*, Second Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc., 2000.

- [11] J. Beyerer, F. P. León i C. Frese, *Machine Vision Automated Visual Inspection: Theory, Practice and Applications*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2016.
- [12] B. Batchelor i F. Waltz, *Intelligent Machine Vision - Techniques, Implementations and Applications*, London: Springer-Verlag, 2001.
- [13] E. Malamas i e. al., „A survey on industrial vision systems, applications and tools,“ *Image and Vision Computing*, t. 21, br. 2003, pp. 171-188, 2003.
- [14] X. Ye, C. Z. Dong i T. Liu, „A Review of Machine Vision-Based Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications,“ *Journal of Sensors*, t. 2016, pp. 1-11, 2016.
- [15] *DIRECTIVE 2010/40/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*, dostupno na <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0040>, pristupljeno 19.11.2019. godine, 2010.
- [16] Z. Yang i L. S. C. Pun-Cheng, „Vehicle detection in intelligent transportation systems and its applications under varying environments: A review,“ *Image and Vision Computing*, t. 69, pp. 143-154, 2018.
- [17] T. Celik i H. Kusetogullari, „Solar-powered automated road surveillance system for speed violation detection,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, t. 57, br. 9, p. 3216–3227, 2010.
- [18] M. Bommers, T. V. A. Fazekas i M. Oeser, „Video based Intelligent Transportation Systems – state of the art and future development,“ *Transportation Research Procedia*, t. 14, pp. 4495-4504, 2016.
- [19] J. Versavel, „Road safety through video detection,“ u *Intelligent Transportation Systems*, 1999.
- [20] P. Michalopoulos, „Vehicle detection video through image processing: the Autoscope system,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, t. 40, br. 1, pp. 21-29, 1991.
- [21] H. Ikeda, Y. Kaneko, T. Matsuo i K. Tsuji, „Abnormal incident detection system employing image processing technology,“ u *Intelligent Transportation Systems*, 1999.
- [22] M. Shehata, J. Cai, W. Badawy, T. Burr i M. Pervez, „Video-Based Automatic Incident Detection for Smart Roads: The Outdoor Environmental Challenges Regarding False Alarms,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 349-360, 2008.



- [23] FLIR, *Intelligent transportation solutions*, FLIR Systems, Inc., 2019.
- [24] B. Fishbain, I. Ideses, D. Mahalel i L. Yaroslavsky, „Real-time vision-based traffic flow measurements and incident detection,“ *Real-Time Image and Video Processing*, 2009.
- [25] D. Y. Chen, Y. H. Lin i Y. J. Peng, „Nighttime brake-light detection by Nakagami imaging,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 13, br. 4, pp. 1627-1637, 2012.
- [26] C. Patel, D. Shah i A. Patel, „Automatic number plate recognition system (ANPR): a survey,“ *International Journal of Computer Applications*, t. 69, br. 9, 2013.
- [27] T. Schamm, C. v. Carlowitz i J. Zöllner, „On-road vehicle detection during dusk and at night,“ u *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2010.
- [28] R. O'Malley, M. Glavin i E. Jones, „Vehicle detection at night based on tail-light detection,“ u *The 1st International Symposium on Vehicular Computing Systems*, Dublin, 2008.
- [29] H. Q. Dinh, *Development of a Video-Based Traffic Data Collection System, Doctoral Dissertation*, 2011.
- [30] Z. G., R. Avery i Y. Wang, „Video-based vehicle detection and classification system for real-time traffic data collection using uncalibrated video cameras,“ *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 138-147, 2007.
- [31] A. Dobschütz i C. Maget, „Fernverkehrserhebung in Bayern,“ u *ASVT 2014.*, 2014.
- [32] X. Li, Y. She, D. Luo i Z. Yu, „A traffic state detection tool for freeway video surveillance system,“ *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, pp. 2453-2461, 2013.
- [33] P. Pongpaibool, P. Tangamchit i K. Noodwong, „Evaluation of road traffic congestion using fuzzy techniques,“ u *TENCON 2007-2007 IEEE Region 10 Conference*, 2007.
- [34] e. a. M. F. Rachmadi, „Adaptive traffic signal control system using camera sensor and embedded system,“ u *TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference*, 2011.
- [35] M. Y. Aalsalem, W. Z. Khan i K. M. Dhabbah, „An automated vehicle parking monitoring and management system using ANPR cameras,“ u *17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2015.

- [36] G. C. C. C. R. P. S. W. D. Paulo, „M25 speed harmonisation,“ u *Road Transport Information and Control Conference and the ITS United Kingdom Members' Conference (RTIC 2010)-Better transport through technology, IET*, 2010.
- [37] S. R. Soomro, M. Javed i F. A. Memon, „Vehicle number recognition system for automatic toll tax collection,“ u *International Conference In Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)*, 2012.
- [38] *PRIRUČNIK ZA PROJEKTOVANJE PUTEVA U REPUBLICI SRBIJI, 11. PROJEKTOVANJE TUNELA 11.6 UPRAVLJANJE TUNELA*, [https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/harmonizacija/prirucnik\\_za\\_projektovanje\\_puteva/SRDM11-6-upravljanje-tunela\(120505-srb-konacni\).pdf](https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/harmonizacija/prirucnik_za_projektovanje_puteva/SRDM11-6-upravljanje-tunela(120505-srb-konacni).pdf), pristupljeno 2.11.2019. godine.
- [39] K. Bimbraw, „Autonomous Cars: Past, Present and Future - A Review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology,“ u *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2015)*, 2015.
- [40] J. Janai, F. Guney, A. Behl i A. Geiger, „Computer Vision for Autonomous Vehicles: Problems, Datasets and State-of-the-Art,“ u *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017.
- [41] S. International, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, 2016.
- [42] E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo i K. Takeda, „A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies,“ *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019.
- [43] M. M. Diaz i F. Soriguera, „Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges,“ *Transportation Research Procedia*, t. 33, pp. 275-282, 2018.
- [44] J. Li, H. Cheng, H. Guo i S. Qiu, „Survey on Artificial Intelligence for Vehicles,“ *Automotive Innovation*, 2018.
- [45] L. T. Services, *Advanced Driver Assistance System (ADAS)*, 2018.
- [46] F. Rosique, P. J. Navarro, C. Fernández i A. Padilla, „A Systematic Review of Perception System and Simulators for Autonomous Vehicles Research,“ *Sensors*, t. 648, p. 19, 2019.



- [47] J. Leonard, J. How, S. Teller, M. Berger, S. Campbell, G. Fiore, L. Fletcher, E. Frazzoli, A. Huang, S. Karaman i e. al., „A perception- driven autonomous urban vehicle,“ *Journal of Field Robotics*,, t. 25, br. 10, pp. 727-774, 2008.
- [48] R. H. Rasshofer i K. Gresser, „Automotive radar and lidar systems for next generation driver assistance functions,“ *Adv. Radio Sci.*, t. 3, br. B.4, pp. 205-209, 2005.
- [49] A. Mukhtar, L. Xia i T. B. Tang, „Vehicle Detection Techniques for Collision Avoidance Systems: A Review,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, t. 16, br. 5, pp. 2318-2338, 2015.
- [50] F. Nashashibi i A. Bargeton, „Laser-based vehicles tracking and classification using occlusion reasoning and confidence estimation,“ u *Proc. IEEE Intell. Veh. Symp.*,, 2008.
- [51] S. Velupillai i L. Guvenc, „Laser scanners for driver-assistance systems in intelligent vehicles [Applications of Control],“ *IEEE Control Syst.*, t. 29, br. 2, pp. 17-19, 2009.
- [52] M. Bertozzi, A. Broggi, M. Cellario, A. Fascioli, P. Lombardi i M. Porta, „Artificial Vision in Road Vehicles,“ *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, t. 90, br. 7, pp. 1258-1271, 2002.
- [53] M. Heimberger, J. Horgan, C. Hughes, J. McDonald i S. Yogamani, „Computer vision in automated parking systems: Design, implementation and challenges,“ *Image and Vision Computing*, t. 68, pp. 88-101, 2017.
- [54] A. Mohamed, J. Ren, M. El-Gindy, H. Lang i A. Ouda, „Literature survey for autonomous vehicles: sensor fusion, computer vision, system identification and fault tolerance,“ *Int. J. Automation and Control*, t. 12, br. 4, pp. 555-581, 2018.
- [55] J. Horgan, C. Hughes, J. McDonald i S. Yogamani, „Vision-Based Driver Assistance Systems: Survey, Taxonomy and Advances,“ u *Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITCS)*, IEEE., Las Palmas, Spain, 2015.
- [56] K. Kovačić, E. Ivanjko i H. Gold, „Computer Vision Systems in Road Vehicles: A Review,“ u *Proceedings of the Croatian Computer Vision Workshop*, Zagreb, Croatia, 2013.



- [57] A. S. Huang, D. Moore, M. Antone, E. Olson i S. Teller, „Finding multiple lanes in urban road networks with vision and lidar,“ *Auton. Robots*, t. 26, br. 2, pp. 103-122, 2009.
- [58] H. Cheng, B. Jeng, P. Tseng i K. Fan, „Lane detection with moving vehicles in the traffic scenes,“ *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, t. 7, br. 4, pp. 571-582, 2006.
- [59] M. Bertozzi, A. Broggi i A. Fascioli, „Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives,“ *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 1-16, 2000.
- [60] S. M. Beuvais i C. Kreucher, „Building world model for mobile platforms using heterogeneous sensors fusion and temporal analysis,“ u *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Boston, 1997.
- [61] J. D. Crisman i C. E. Thorpe, „UNSCARF, A color vision system for the detection of unstructured roads,“ u *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1991.
- [62] K. I. Kim, S. Y. Oh, S. Kim, H. Jeong, C. N. Lee, B. S. Kim i C. S. Kim, „An autonomous land vehicle PRV II: Progresses and performance enhancement,“ u *Proc. IEEE IV*, 1995.
- [63] J. P. González i Ü. Özgüner, „Lane detection using histogrambased segmentation and decision trees,“ u *Proc. IEEE ITS*, 2000.
- [64] M. Lützel i E. D. Dickmanns, „Road recognition with MarVEye,“ u *Proc. IEEE IV*, 1998.
- [65] U. Franke i I. Kutzbach, „Fast Stereo Based Object Detection for Stop & Go Traffic,“ u *IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, 1996.
- [66] J. Goldbeck i B. Huertgen, „Lane detection and tracking by video sensors,“ u *Proc. ITS*, 1999.
- [67] K. A. Redmill, „A simple vision system for lane keeping,“ u *Proc. IEEE ITS*, 1997.
- [68] S. M. Wong i M. Xie, „Lane geometry detection for the guidance of smart vehicle,“ u *Proc. IEEE ITS*, 1999.
- [69] A. Broggi i S. Bertè, „Vision-based road detection in automotive systems: A real-time expectation-driven approach,“ *J. Artif. Intell. Res.*, t. 3, pp. 325-348, 1995.
- [70] S. Denasi, C. Lanzone, P. Martinese, G. Pettiti, G. Quaglia i L. Viglione, „Real-time system for road following and obstacle detection,“ u *Proc. SPIE on Machine Vision Applications, Architectures, and Systems Integration III*, 1994.



- [71] X. Youchun, W. Rongben i J. Shouwen, „A vision navigation algorithm based on linear lane model,“ u *Proc. IEEE IV*, 2000.
- [72] Jochem, D. A. Pomerleau i C. E. Thorpe, „MANIAC: A next generation neurally based autonomous road follower,“ u *Proc. 3rd Int. Conf. Intelligent Autonomous Systems*, 1993.
- [73] S. W. e. al., „Vision-Based Traffic Sign Detection and Recognition Systems: Current Trends and Challenges,“ *Sensors*, t. 2093, p. 19, 2019.
- [74] D. Nandi, A. Saif, P. Prottoy, K. Zubair i S. Shubho, „Traffic Sign Detection based on Color Segmentation of Obscure Image Candidates: A Comprehensive Study,“ *Int. J. Mod. Educ. Comput. Sci.*, t. 10, br. 35, 2018.
- [75] M. Hannan, A. Hussain, A. Mohamed, S. Samad i D. Wahab, „Decision fusion of a multi-sensing embedded system for occupant safety measures,“ *Int. J. Automot. Technol.*, t. 11, pp. 54-65, 2010.
- [76] A. Møgelmoose, M. Trivedi i T. Moeslund, „Vision-Based Traffic Sign Detection and Analysis for Intelligent Driver Assistance Systems: Perspectives and Survey,“ *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, t. 13, pp. 1484-1497, 2012.
- [77] F. Shao, X. Wang, F. Meng, T. Rui, D. Wang i J. Tang, „Real-time traffic sign detection and recognition method based on simplified Gabor wavelets and CNNs,“ *Sensors*, t. 18, 2018.
- [78] Y. Saadna i A. Behloul, „An overview of traffic sign detection and classification methods,“ *Int. J. Multimed. Inf. Retr.*, t. 6, pp. 193-210, 2017.
- [79] X. Xu, J. Jin, S. Zhang, L. Zhang, S. Pu i Z. Chen, „Smart data driven traffic sign detection method based on adaptive color threshold and shape symmetry,“ *Future Gener. Comput. Syst.*, t. 94, pp. 381-391, 2019.
- [80] H.-Y. Lina, C.-C. Chang i S.-C. Huang, „Traffic Sign Detection and Recognition for Driving Assistance System,“ *Advances in Image and Video Processing*, t. 6, br. 3, pp. 17-25, 2018.
- [81] P. Karthiga, S. Roomi i Kowsalya.J, „TRAFFIC-SIGN RECOGNITION FOR AN INTELLIGENT VEHICLE/DRIVER ASSISTANT SYSTEM USING HOG,“ *Computer Science & Engineering: An International Journal (CSEIJ)*, t. 6, br. 1, pp. 15-23, 2016.

- [82] Q. Hu, S. Paisitkriangkrai, C. Shen, A. van den Hengel i F. Porikli, „Fast detection of multiple objects in traffic scenes with a common detection framework,“ *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, t. 17, pp. 1002-1014, 2016.
- [83] S. S. M. Sallah, F. A. Hussin i M. Z. Yusoff, „Road sign detection and recognition system for real-time embedded applications,“ u *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, Pahang, Malaysia, 2011.
- [84] K. T. Islam i R. G. Raj, „Real-Time (Vision-Based) Road Sign Recognition Using an Artificial Neural Network,“ *Sensors*, t. 17, br. 853, 2017.
- [85] N. A. Wright, B. M. Stone, T. J. Horberry i N. Reed, „A REVIEW OF IN-VEHICLE SLEEPINESS DETECTION DEVICES - PUBLISHED PROJECT REPORT PPR157,“ TRL Limited, 2007.
- [86] Z. Sun i R. M. G. Bebis, „On-Road Vehicle Detection Using Optical Sensors: A Review,“ u *The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2004.
- [87] D. Guo, T. Fraichard, M. Xie i C. Laugier, „Color modeling by spherical influence field in sensing driving environment,“ u *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, 2000.
- [88] H. Mori i N. Charkai, „Shadow and rhythm as sign patterns of obstacle detection,“ u *International Symposium on industrial electronics*, 1993.
- [89] M. Bertozzi, A. Broggi i S. Castelluccio, „A real-time oriented system for vehicle detection,“ *Journal Of Systems Architecture*, pp. 317-325, 1997.
- [90] M. Betke, E. Haritaglu i L. Davis, „Real-time multiple vehicle detection and tracking from a moving vehicle,“ *Machine Vision and Applications*, t. 12, br. 2, 2000.
- [91] T. A. Williamson, *A High-Performance Stereo Vision System - PhD Thesis*, 1998.
- [92] M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli i S. Nichele, „Stereo vision-based vehicle detection,“ u *IEEE Intelligent vehicle symposium*, 2000.
- [93] U. Franke, D. Gavrila, S. Görzig, F. Lindner, F. Paetzold i C. Wöhler, „Autonomous driving goes downtown,“ u *Proc. IEEE IV*, 1998.
- [94] Y. Wei, Q. Tian, J. Guo, W. Huang i J. Cao, „Multi-vehicle detection algorithm through combining Harr and HOG features,“ *Mathematics and Computers in Simulation*, t. 155, pp. 130-145, 2019.



- [95] S. Sivaraman, „General Active-Learning Framework for On-Road Vehicle Recognition and Tracking,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, t. 11, br. 2, pp. 267-276, 2010.
- [96] O. L. Jr, „Improving the Generalization Properties of Neural Networks: an Application to Vehicle Detection,“ u *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC 2008*, Beijing, China, 2008.
- [97] D. Gavrilu, „Pedestrian Detection from a Moving Vehicle,“ u *6th European Conference on Computer Vision-Part II*, 2000.
- [98] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli i M. Sechi, „Shape-based pedestrian detection,“ u *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2000.
- [99] U. Franke i A. Joos, „Real-Time Stereo Vision for Urban Traffic Scene Understanding,“ u *IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, 2000.
- [100] S. Nedevschi, S. Bota i C. Tomiuć, „Stereo-Based Pedestrian Detection for Collision-Avoidance Applications,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, t. 10, br. 3, pp. 380-391, 2009.
- [101] L. Zhao i C. E. Thorpe, „Stereo- and Neural Network-Based Pedestrian Detection,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, t. 1, br. 3, pp. 148-154, 2000.
- [102] C. Wöhler, U. Kressler i J. K. Anlauf, „Pedestrian recognition by classification of image sequences. Global approaches vs local spatiotemporal processing,“ u *IEEE Int. Conf. Pattern Recognition*, 2000.
- [103] F. Zhang, D. Clarke i A. Knoll, „Vehicle Detection Based on LiDAR and Camera Fusion,“ u *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, 2014.
- [104] X. Wang, L. Xu, H. Sun, J. Xin i N. Zheng, „On-Road Vehicle Detection and Tracking Using MMW Radar and Monovision Fusion,“ *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, t. 17, p. 2075–2084, 2016.
- [105] D. Göhring, M. Wang, M. Schnürmacher i T. Ganjineh, „Radar/Lidar Sensor Fusion for Car-Following on Highways,“ u *5th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, Wellington, New Zealand, 2011 .

- [106] D. Geronimo, A. M. Lopez i A. D. Sappa, „Survey of Pedestrian Detection for Advanced Driver Assistance Systems,“ *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, t. 32, br. 7, pp. 1239-1258, 2010.
- [107] Waymo, „Waymo Safety Report - On the Road to Fully Self-Driving,“ Waymo, 2018.
- [108] [Na mreži]. Available: <https://www.railjournal.com/opinion/rail-autonomous-trains>, pristupljeno 10.11.2019..
- [109] N. P. V. P. M. Pavlović, „METHODS FOR DETECTION OF OBSTACLES ON THE RAILWAY LEVEL CROSSING,“ u *XVII Scientific-Expert Conference on Railways RAILCON '16*, Niš, Serbia, 2016.
- [110] N. K. L. E.-K. E. J. J. D. J. Fakhfakh, „A video-based object detection system for improving safety at level crossings,“ *Open Transportation Journal, Safety on Level Crossings*, , t. 15, 2010.
- [111] V. Amaral, F. Marques, A. Lourenço, J. Barata i P. Santana, „Laser-Based Obstacle Detection at Railway Level Crossings,“ *Journal of Sensors*, pp. 1-12, 2016.
- [112] Y. Hisamitsu, K. Sekimoto, K. Nagata, M. Uehara i E. Ota, „3-D Laser Radar Level Crossing Obstacle Detection System,“ *Engineering Review*, t. 41, br. 2, pp. 51-57, 2008.
- [113] .. Iwata i e. al., „Object detection with background occlusion modeling by using multiple laser range scanners,“ u *6th International Conference on ASIA GIS*, 2006.
- [114] N. Fakhfakh, L. Khoudour, E. El-Koursi, J. L. Bruyelle, A. Dufaux i J. Jacot, „3D Objects Localization Using Fuzzy Approach and Hierarchical Belief Propagation: Application at Level Crossings,“ *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, t. 2011, pp. 1-15, 2011.
- [115] M. Ohta, „Level Crossings Obstacle Detection System Using Stereo Cameras,“ *Quarterly Report of RTRI*, t. 46, br. 2, pp. 110-117, 2005.
- [116] J. J. García i e. al., „Dedicated Smart IR Barrier for Obstacle Detection in Railways,“ u *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005*, 2005.
- [117] J. J. García i e. al, „Efficient Multisensory Barrier for Obstacle Detection on Railways,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, t. 11, br. 3, pp. 702-713, 2010.



- [118] S. Oh, S. Park i C. Lee, „A Platform Surveillance Monitoring System using Image Processing for Passenger Safety in Railway Station,“ u *International Conference on Control, Automation and Systems 2007*, Seoul, Korea, 2007.
- [119] J. J. Garcia-Dominguez i e. al., „Multi-sensory system for obstacle detection on railways,“ u *Instrumentation and Measurement Technology 2008. IMTC 2008. IEEE*, 2008.
- [120] [Na mreži]. Available: <http://fokus-tech.com/products-solutions/>, pristupljeno 10.11.2019..
- [121] R. Passarella, B. Tutuko i A. P. Prasetyo, „DESIGN CONCEPT OF TRAIN OBSTACLE DETECTION SYSTEM IN INDONESIA,“ *International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJRRAS)*, t. 9, br. 3, pp. 453-460, 2011.
- [122] M. Ukai, „A New System for Detecting Obstacles in Front of a Train,“ *Railway Technology Avalanche*, t. 12, 2006.
- [123] J. A. Uribe, L. Fonseca i J. F. Vargas, „Video Based System for Railroad Collision Warning,“ u *2012 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*, 2012.
- [124] S. Aminmansour, F. Maire i C. Wullems, „Near-Miss Event Detection at Railway Level Crossings,“ u *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA 2014)*, IEEE, 2014.
- [125] H. Möller, B. Hulin, W. Krötz i B. Sarnes, „Video based obstacle detection in catenaries of railways,“ u *6th International Conference on Pattern Recognition and*, 2001.
- [126] M. Rüder, N. Mohler i F. Ahmed, „An obstacle detection system for automated trains,“ u *Intelligent Vehicles Symposium*, 2003.
- [127] F. Kruse, S. Milch i H. Rohling, „Multi sensor system for obstacle detection in train applications,“ u *IEEE Tr.*, 2003.
- [128] S. Möckel, F. Scherer i P. Schuster, „Multisensor obstacle detection on railway tracks,“ u *Intelligent Vehicles Symposium, IEEE*, 2003.
- [129] M. Ukai, B. T. Nassu i N. Nagamine, „Obstacle Detection on Railway Track by Fusing Radar and Image Sensor,“ u *9th World Congress Railway Research*, 2011.

- [130] J. Weichselbaum i e. al., „Accurate 3D-vision-based obstacle detection for an autonomous train,“ *Computers in Industry*, t. 64, pp. 1209-1220, 2013.
- [131] D. R. Durrant i e. al, „Multimodal Sensor Fusion for Reliable Detection of Obstacles on Railway Tracks,“ *Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology*, t. 3, br. 2, pp. 1-7, 2018.
- [132] [Na mreži]. Available: <https://www.kappa-optronics.com/en/vision-solutions/railway-vision-solutions.cfm>, pristupljeno 10.11.2019. godine.
- [133] [Na mreži]. Available: <https://urban-transport-magazine.com/en/uitp-bombardier-presents-new-driver-assistance-system-for-trams-and-light-rail/> , pristupljeno 10.11.2019. godine.
- [134] [Na mreži]. Available: [https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.bt\\_20171004\\_bombardiers-driver-assistance-system-for-trams-and-l.bombardiercom.html](https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.bt_20171004_bombardiers-driver-assistance-system-for-trams-and-l.bombardiercom.html), pristupljeno 10.11.2019. godine.
- [135] [Na mreži]. Available: [https://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130\\_25692.aspx](https://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130_25692.aspx) , pristupljeno 10.11.2019. godine.
- [136] M. Sonka, V. Hlavac i R. Boyle, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, 3rd Edition, Toronto, Ontario: Thomson Learning, 2008.
- [137] I. T. Young, J. J. Gerbrands i L. J. van Vliet, *Fundamentals of Image Processing*, Delft University of Technology, 1995.
- [138] R. C. Gonzalez i R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Third Edition, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2008.
- [139] M. Vollmer i K.-P. Möllmann, *Thermal Imaging Fundamentals, Research and Applications*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 2010.
- [140] I. T. Ćirić, *Inteligentno upravljanje mobilnim robotima na osnovu neuro-fazigenetskog prepoznavanja objekata i praćenja ljudi u robotskoj viziji*, *Doktorska disertacija*, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, 2015.
- [141] B. Jähne, *Digital Image processing*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [142] M. Pavlović i M. Tomić, „Primena metoda procesiranja slika za povećanje bezbenosti na pružnim prelazima,“ u *12. Međunarodno savetovanje Rizik i bezbednosni inženjering*, Kopaonik, Republika Srbija, 2017.

- [143] T. Bose, F. Meyer i M.-Q. Chen, *Digital Signal and Image Processing*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [144] C. Solomon i T. Breckon, *Fundamentals of digital image processing - a practical approach with examples in Matlab*, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [145] R. Jain, R. Kasturi i B. G. Schunck, *Machine vision*, McGraw-hill, Inc., 1995.
- [146] M. Pavlović, V. Nikolić, I. Ćirić i M. Simonović, „Advanced Edge Detection Techniques for Rail Track Detection Using Thermal Camera,“ u *The 4th International Conference Mechanical Engineering in XXI Century*, Niš, Serbia, 2018.
- [147] E. Nadernejad, S. Sharifzadeh i H. Hassanpour, „Edge Detection Techniques: Evaluations and Comparisons,“ *Applied Mathematical Sciences*, t. 2, br. 31, pp. 1507-1520, 2008.
- [148] J. R. Parker, *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, Second Edition, Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, Inc, 2011.
- [149] M. G. Pavlović, I. T. Ćirić, D. Ristić-Durrant, V. D. Nikolić, M. B. Simomović, M. V. Ćirić i M. S. Banić, „Advanced Thermal Camera Based System for Object Detection on Rail Tracks,“ *Thermal Science*, t. 22, br. 5, pp. S1551-S1561, 2018.
- [150] M. Pavlović, V. Nikolić, M. Simonović, V. Mitrović i I. Ćirić, „Edge Detection Parameter Optimization Based on the Genetic Algorithm for Rail Track Detection,“ *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering*, t. 17, br. 3, pp. 333-344, 2019.
- [151] A. M. S. Bhardwaj, „A Survey on Various Edge Detector Techniques,“ *Procedia Technology*, t. 4, pp. 220-226, 2012.
- [152] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection,“ *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, t. PAMI, br. 8(6), pp. 679-698., 1986.
- [153] M. Accame i F. G. B. De Natale, „Edge detection by point classification of Canny filtered images,“ *Signal Processing*, t. 60, pp. 11-22, 1997.
- [154] T. Moeslund, *Canny Edge Detection*, Laboratory of Computer Vision and Media Technology, Aalborg University, Denmark, 2009.
- [155] Y. Huo, G. Wei, Y. Zhang i L. Wu, „An adaptive threshold for the Canny Operator of edge detection,“ u *International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, 2010.

- [156] Y. Wang i J. Li, „An Improved Canny Algorithm with Adaptive Threshold Selection,“ u *MATEC Web of Conferences*, 22, , 2015.
- [157] C. Deng, G. Wang i X. Yang, „Image Edge Detection Algorithm Based on Improved Canny Operator,“ u *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, 2013.
- [158] J. Song, Z. Chi i J. Liu, „A robust eye detection method using combined binary edge and intensity information,“ *Pattern Recognition*, t. 39, pp. 1110-1125, 2006.
- [159] S. Jabri, Z. Duric, H. Wechler i A. Rosenfeld, „Detection and location of people in video images using adaptive fusion of color and edge information,“ u *15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*, 2000.
- [160] K. Sandeep i A. N. Rajagopalan, „Human Face Detection in Cluttered Color Images Using Skin Color, Edge Information,“ u *Third Indian Conference on Computer Vision, Graphics & Image Processing*, Ahmadabad, India, 2002.
- [161] M. Pavlović, I. Ćirić, V. Nikolić, M. Simonović, E. Petrović i M. Ćirić, „Advanced Infrared Camera Based System for Pedestrian Detection on Railway Crossings,“ u *18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbian*, Sokobanja, Republic of Serbia, 2017.
- [162] V. Shapiro, D. Dimov, S. Bonchev, V. Velichkov i G. Gluchev, „Adaptive License Plate Image Extraction,“ u *International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech'2003*, 2003.
- [163] R. Chen i Y. Luo, „An Improved License Plate Location Method Based On Edge Detection,“ *Physics Procedia*, t. 24, pp. 1350-1356, 2012.
- [164] M. Fathy i M. Y. Siyal, „An image detection technique based on morphological edge detection and background differencing for real-time traffic analysis,“ *Pattern Recognition Letters*, t. 16, pp. 1321-1330, 1995.
- [165] J. R. Dim i T. Takamura, „Alternative Approach for Satellite Cloud Classification: Edge Gradient Application,“ *Advances in Meteorology*, t. 2013, 2013.
- [166] M. Asghari i B. Jalali, „Edge Detection in Digital Images Using Dispersive Phase Stretch Transform,“ *International Journal of Biomedical Imaging*, t. 2015, 2015.
- [167] J. Zhang i R. Kasturi, „Text Detection Using Edge Gradient and Graph Spectrum,“ u *International Conference on Pattern Recognition*, 2010.





- [168] T. L. Williams, *Thermal Imaging Cameras Characteristics and Performance*, New York: Taylor & Francis Group, 2009..
- [169] 8 6 2020. [Na mreži]. Available:  
<https://www.flir.com/support/products/e50/#Overview>.
- [170] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip i T. Jayakumar, „Infrared thermography for condition monitoring: A review,“ *Infrared Physics & Technology*, t. 60, pp. 35-55, 2013.
- [171] C. Meola, R. D. Maio, N. Roberti i G. M. Carlomagno, „Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures,“ *Engineering Failure Analysis*, t. 12, p. 875–892, 2005.
- [172] B. Hull i V. John, *Non-destructive Testing*, London: MacMillan Education LTD , 1988.
- [173] E. Barreira i V. P. d. Freitas, „Evaluation of building materials using infrared thermography,“ *Construction and Building Materials*, t. 21, pp. 218-224, 2007.
- [174] J. F. Florez-Ospina i H. D. Benitez, „From local to global analysis of defect detectability in infrared non-destructive testing,“ *Infrared Physics & Technology*, t. 63, pp. 211-221, 2014.
- [175] A. S. N. Huda i S. Taib, „Application of infrared thermography for predictive-preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment,“ *Applied Thermal Engineering*, t. 61, pp. 220-227, 2013.
- [176] U. Sreedhara, C. V. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam, V. D. Raghupathy i S. Ravisankar, „Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring,“ *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1557-1566, 2012.
- [177] H. Kaplan, *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, 3rd edition, Bellingham: SPIE, 2007.
- [178] A. Kylili, P. A. Fokaides, P. Christou i S. A. Kalogirou, „Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review,“ *Applied Energy*, t. 134, p. 531–549, 2014.

- [179] M. Fox, D. Coley, S. Goodhew i P. de Wilde, „Thermography methodologies for detecting energy related building defects,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 40, pp. 296-310, 2014.
- [180] J. Peng, L. Lu i H. Yang, „An experimental study of the thermal performance of a novel photovoltaic double-skin facade in Hong Kong,“ *Solar Energy*, t. 97, pp. 293-304, 2013.
- [181] S. Korniyenko, „Evaluation of Thermal Performance of Residential Building,“ *Procedia Engineering*, t. 117, pp. 191-196, 2015.
- [182] E. Grinzato, V. Vavilov i T. Kauppinen, „Quantitative infrared thermography in buildings,“ *Energy and Buildings*, t. 29, pp. 1-9, 1998.
- [183] A. Gowen, B.K.Tiwari, P. Cullen, K. McDonnell i C. P. O'Donnell, „Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment,“ *Trends in Food Science & Technology*, t. 21, pp. 190-200, 2010.
- [184] H. Huang, H. Yu, H. Xu i Y. Ying, „Near infrared spectroscopy for on-in-line monitoring of quality in foods and beverages: A review,“ *Journal of Food Engineering*, t. 87, pp. 303-313, 2008.
- [185] M. F. Piñeros, E. A. Ritchie i J. S. Tyo, „Detecting Tropical Cyclone Genesis From Remotely Sensed Infrared Image Data,“ *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, t. 7, br. 4, pp. 826-830, 2010.
- [186] M. F. Piñeros, E. A. Ritchie i J. S. Tyo, „Objective Measures of Tropical Cyclone Structure,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 46, br. 11, pp. 3574-3580, 2008.
- [187] J. Schmetz, K. Holmlund, J. Hoffman, B. Strauss, B. Mason, V. Gaertner, A. Koch i L. V. D. Berg, „Operational Cloud-motion Winds from Meteosat Infrared Images,“ *Journal of Applied Meteorology*, t. 32, pp. 1206-1225, 1993.
- [188] N. Arora, D. Martins, D. Ruggerio, E. Tousimis, A. J. Swistel, M. P. Osborne i R. M. Simmons, „Effectiveness of a noninvasive digital infrared thermal imaging system in the detection of breast cancer,“ *The American Journal of Surgery*, t. 196, pp. 523-526, 2008.

- [189] M. Pavlović, V. Nikolić, I. Ćirić i M. Ćirić, „Application of thermal imaging systems for object detection,“ u *13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering*, Banja Luka, Republic of Srpska,, 2017.
- [190] A. Fernández-Caballero, J. C. Castillo, J. Martínez-Cantos i R. Martínez-Tomás, „Optical flow or image subtraction in human detection from infrared camera on mobile robot,“ *Robotics and Autonomous Systems*, t. 58, p. 1273–1281, 2010.
- [191] I. T. Ćirić, Ž. Čojbašić, D. Ristić-Durrant, V. Nikolić, M. Ćirić, M. Simonović i I. Pavlović, „Thermal vision based intelligent system for human detection and tracking in mobile robot control system,“ *Thermal Science*, t. 20, pp. S1553-S1559, 2016.
- [192] L. Andreone, P. C. Antonello, M. Bertozzi, A. Broggi, A. Fascioli i D. Ranzato, „Vehicle Detection and Localization in Infra-Red Images,“ u *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2002.
- [193] Y. Iwasaki, M. Misumi i T. Nakamiya, „Robust Vehicle Detection under Various Environmental Conditions Using an Infrared Thermal Camera and Its Application to Road Traffic Flow Monitoring,“ *Sensors*, t. 13, pp. 7756-7773, 2013.
- [194] A. Broggi, A. Fascioli, M. Carletti, T. Graf i M. Meinecke, „A Multi-resolution Approach for Infrared Vision-based Pedestrian Detection,“ u *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Parma, Italy, 2004.
- [195] M. Bertozzi, A. Broggi, C. Caraffi, M. D. Rose, M. Felisa i G. Vezzoni, „Pedestrian detection by means of far-infrared stereo vision,“ *Computer Vision and Image Understanding*, t. 106, p. 194–204, 2007.
- [196] A. Forth i F. Zamjatnins, „Night-vision device for railway vehicles for improving safety,“ *Signal+Dracht*, t. 107, pp. 38-43, 2015.
- [197] A. Berg, K. Öfjäll, J. Ahlberg i M. Felsberg, „Detecting Rails and Obstacles Using a Train-Mounted Thermal Camera,“ u *The 19th Scandinavian Conference, SCIA 2015*, Copenhagen, Denmark, 2015.
- [198] M. Pavlović, I. Ćirić, V. Nikolić, E. Petrović i D. Radovanović, „Night Vision Based System for ATO Obstacle Detection,“ u *Scientific-Expert Conference on Railways RAILCON '18*, Niš, 2018.
- [199] S. J. Petričević, B. Brindić, M. C. Tomić, P. M. Mihailović, M. Barjaktarović i L. Tomić, „Praćenje karakteristika mikrokanalne ploče u sistemu pojačavača slike,“ u

Zbornik 61. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu, Kladovo, 2017.

- [200] S. Ceccon, F. Auteri, A. Baron, M. Belan, G. Gibertini i M. Quadrio, „Turbulent flow in a helically coiled pipe: an endoscopic PIV study, Scientific Report DIA-SR 06-09,“ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Milano, Italy, 2006.
- [201] „SMART Smart Automation of Rail Transport - Deliverable D1.1 Obstacle Detection System Requirements and Specification,“ 2019.
- [202] K. Chrzanowski, „Review of night vision technology,“ *OPTO-ELECTRONICS REVIEW*, t. 2, br. 21, pp. 153-181, 2013.
- [203] „<https://www.photonis.com/products/image-intensifier-tube>, pristupljeno 18.11.2019.“.
- [204] „[https://harderdigital.com/products/#generation\\_iii\\_image\\_intensifiers](https://harderdigital.com/products/#generation_iii_image_intensifiers), pristupljeno 17.11.2019.,“ [Na mreži].
- [205] SAVER, Handbook of night vision technologies, System Assessment and Validation for Emergency Responders, 2013.
- [206] M. Couter i V. Plotsker, „Design Challenges and Consideration for Image Fusion in Multi-Spectral Optical Systems,“ u *OASYS Proceedings SPIE 5783, Infrared Technology and Applications XXXI*.
- [207] J. M. Kriesel i N. Gat, „True color night vision (TCNV) fusion system using VNIR EMCCD and LWIR microbolometer camera,“ u *Proceedings SPIE 7697, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIX*, 2010.
- [208] *Zakon o bezbednosti u železničkom saobraćaju*, Službeni glasnik Republike Srbije, 2018. godina, Godina LXXIV – broj 41.
- [209] *UIC CODE 505-1, Railway transport stock, Rolling stock construction gauge*, 2003.
- [210] [Na mreži]. Available: <http://www.extech.com/products/HD450>. [Poslednji pristup 8 5 2020].
- [211] [Na mreži]. Available: <https://www.flir-direct.com/product/flir-e50-infrared-camera>. [Poslednji pristup 8 5 2020].
- [212] M. Pavlović, I. Ćirić, V. Nikolić, M. Simonović i J. Stevanović, „Thermal Image Processing for Autonomous Train Operation Obstacle Detection System,“ u *XXVII MHTK „AIII-2018”*, Sozopol, Bulgaria, 2018.

- [213] [Na mreži]. Available: <https://www.flir.com/products/tau-2/?model=46640013H>. [Poslednji pristup 8 5 2020].
- [214] [Na mreži]. Available: <https://www.oemcameras.com/flir-tau2-640-100mm-7-5-thermal-imaging-camera-core.htm>. [Poslednji pristup 8 5 2020].
- [215] *SMART Smart Automation of Rail Transport Deliverable D2.1 Report on selected sensors for multi-sensory system for obstacle detection obstacle detection*, 2019.
- [216] [Na mreži]. Available: <https://www.workswell-thermal-camera.com/our-products/usb3-gige-modules-flir-tau2-sensors/>. [Poslednji pristup 8 5 2020].
- [217] M. Fang, G. Yue i Q. Yu, „The study on an application of Otsu method in canny operator,“ u *International Symposium on Information Processing*, 2009.
- [218] [Na mreži]. Available: <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/gige-monochrome/dmk33gp031/>. [Poslednji pristup 10 5 2020].
- [219] J. W. Lu, J. C. Ren, Y. Lu, X. H. Yuan i C. G. Wang, „A modified canny algorithm for detecting sky-sea line in infrared images,“ u *Sixth International Conference Intelligent Sys-tems Design and Applications (ISDA)*, 2006..
- [220] J. Wang, J. He, Y. Han, C. Ouyang i D. Li, „An Adaptive Thresholding algorithm of field leaf image,“ *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 96, pp. 23-39, 2013.
- [221] D. Zhang i S. Zhao, „An Improved Edge Detection Algorithm Based on Canny Operator,“ *Applied Mechanics and Materials*, tom. %1 od %2347-350, pp. 3541-3545, 2013.
- [222] Y. Meng, Z. Zhang, H. Yin i T. Ma, „Automatic detection of particle size distribution by image analysis based on local adaptive canny edge detection and modified circular Hough transform,“ *Micron*, t. 106, pp. 34-41, 2018.
- [223] M. Li, J. H. Yan, G. Li i J. Zhao, „Self-adaptive Canny operator edge detection technique,“ *Journal of Harbin Engineering University*, t. 9, pp. 1002-1007, 2007.
- [224] S. H. Chang, L. G. Gong, M. Q. Li, X. Y. Hu i J. W. Yan, „Small retinal vessel extraction using modified canny edge detection,“ u *IEEE International Conference on Audio, Languages, and Image Processing*, 2008.
- [225] R. Medina-Carnicer, R. Munoz-Salinas, E. Yeguas-Bolivar i L. Diaz-Mas, „A novel method to look for the hysteresis thresholds for the Canny edge detector,“ *Pattern Recognition*, t. 44, pp. 1201-1211, 2011.

- [226] R. Biswas i J. Sil, „An Improved Canny Edge Detection Algorithm Based on Type-2 Fuzzy Sets,“ *Procedia Technology*, t. 4, pp. 820-824, 2012.
- [227] H. Fei, S. Jinfei, Z. Zhisheng, C. Ruwen i Z. Songqing, „Canny edge detection enhancement by general auto-regression model and bi-dimensional maximum conditional en-tropy,“ *Optik*, t. 125, pp. 3946-3953, 2014.
- [228] X. M. Zhao, W. X. Wang i L. P. Wang, „Parameter optimal determination for canny edge detection,“ *The Imaging Science Journal*, vol. 59, pp. 332-341, 2010., t. 59, pp. 332-341, 2010.
- [229] D. Whitley, „A genetic algorithm tutorial,“ *Statistics and Computing*, t. 4, pp. 65-85, 1994.
- [230] V. Đ. Kerleta, „Planiranje razvoja distributivnih mreža korišćenjem unapređenog heurističkog pristupa,“ Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2014.
- [231] M. Paulinas i A. Ušinskas, „A survey of genetic algorithms applications for image enhancement and segmentation,“ *Information Technology and Control*, t. 36, br. 3, pp. 278-284, 2007.
- [232] M. Mitchel, An introduction to genetic algorithms, Massachusetts: : Massachusetts Institute of Technology., 1998.
- [233] M. Kumar, M. Husian, N. Upreti i D. Gupta, „Genetic algorithm: Review and application,“ *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, t. 2, br. 2, pp. 451-454, 2010.
- [234] A. Roy, A. Manna i S. Maity, „A novel memetic genetic algorithm for solving traveling salesman problem based on multi-parent crossover technique,“ *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, t. 2, br. 2, 2019.
- [235] V. Ayala-Ramirez, C. H. Garcia-Capulin, A. Perez-Garcia i R. E. Sanchez-Yanez, „Circle detection on images using genetic algorithms,“ *Pattern Recognition Letters*, t. 27, pp. 652-657, 2006.
- [236] M. Al-Rawi i H. Karajeh, „Genetic algorithm matched filter optimization for automated detection of blood vessels from digital retinal images,“ *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, t. 87, p. 248–253, 2007.

- [237] B. Jeon, J. Jang i K. Hong, „Road detection in spaceborne sar images using a genetic algorithm,“ *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 40, br. 1, pp. 22-29, 2002.
- [238] M. Shyu i J. Leou, „A genetic algorithm approach to color image enhancement,“ *Pattern Recognition*, t. 31, br. 7, pp. 871-880, 1998.
- [239] S. Hashemi, S. Kiani, N. Noroozi i M. E. Moghaddam, „An image contrast enhancement method based on genetic algorithm,“ *Pattern Recognition Letters*, t. 31, pp. 1816-1824, 2010.
- [240] M. Abbasgholipour, M. Omid, A. Keyhani i S. S. Mohtasebi, „Color image segmentation with genetic algorithm in a raisin sorting system based on machine vision in variable conditions,“ *Expert Systems with Applications*, t. 38, pp. 3671-3678, 2011.
- [241] S. Cagnoni, A. B. Dobrzeniecki, R. Poli i J. C. Yanch, „Genetic algorithm-based interactive segmentation of 3D medical images,“ *Image and Vision Computing*, t. 17, pp. 881-895, 1999.
- [242] B. Bhanu i Y. Y. Lin, „Genetic algorithm based feature selection for target detection in SAR images,“ *Image and Vision Computing*, t. 21, pp. 591-608, 2003.
- [243] B. Sahiner, H. Chan, D. Wei, N. Petrick, M. A. Helvie, D. D. Adler i M. M. Goodsitt, „Image feature selection by a genetic algorithm: Application to classification of mass and normal breast tissue,“ u *The international Journal of Medical Physics Research and Practice*, 1996.
- [244] M. Pavlović, V. Mitrović, I. Ćirić, B. Petrović, V. Nikolić, M. Ćirić i M. Simonović, „Determination of Optimal Parameter for Edge Detection Based on Genetic Algorithm,“ u *XIV International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, Niš, Serbia, 2018.
- [245] M. Pavlović, I. Ćirić, M. Simonović i V. Nikolić, „Application of Different Methods for Distance Estimation,“ u *PaKSoM 2019 1st Virtual International Conference Path to a Knowledge Society-Managing Risks and Innovation*, Niš, Serbia, 2019.
- [246] Y. D. Salman, K. Ku-Mahamud i E. Kamioka, „Distance measurement for self-driving cars using stereo camera,“ u *6th Int. Conf. on Computing and Informatics*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017.

- [247] S. Sivaraman i M. M. Trivedi, „Looking at Vehicles on the Road: A Survey of Vision-Based Vehicle Detection, Tracking, and Behavior Analysis,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 14, br. 4, pp. 1773-1795, 2013.
- [248] F. d. P. Müller, „Survey on Ranging Sensors and Cooperative Techniques for Relative Positioning of Vehicles,“ *Sensors*, t. 17, br. 271, pp. 1-27, 2017.
- [249] S. Lee, M. H. Hayes i J. Paik, „Distance estimation using a single computational camera with dual off-axis color filtered apertures,“ *Optics Express*, t. 21, br. 20, pp. 23116-23129, 2013.
- [250] A. Rahman, A. Salam, M. Islam i P. Sarker, „An Image Based Approach to Compute Object Distance,“ *International Journal of Computational Intelligence Systems*, t. 1, br. 4, pp. 304-312, 2008.
- [251] X. Dong, F. Zhang i P. Shi, „A novel approach for face to camera distance estimation by monocular vision,“ *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, t. 10, br. 2, pp. 659-669, 2014.
- [252] R. Deepu, S. Murali i V. Raju, „A Mathematical model for the determination of distance of an object in a 2D image,“ u *International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (ICCV) (p. 1). The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp)*, 2013.
- [253] K. Hyongsuk, L. Chun-Shin, S. Jaehong i C. Heesung, „Distance Measurement Using a Single Camera with a Rotating Mirror,“ *International Journal of Control, Automation, and Systems*, t. 3, br. 4, pp. 542-551, 2005.
- [254] H. Deng-Yuan, C. Chao-Ho, C. Tsong-Yi, H. Wu-Chih i F. Kai-Wei, „Vehicle detection and inter-vehicle distance estimation using single-lens video camera on urban/suburb roads,“ *J. Vis. Commun. Image R.*, t. 46, pp. 250-259, 2017.
- [255] K. Giseok i C. Jae-Soo, „Vision-Based Vehicle Detection and Inter-Vehicle Distance Estimation for Driver Alarm System,“ *OPTICAL REVIEW*, t. 19, br. 6, pp. 388-393, 2012.
- [256] C. Hoi-Kok, S. Wan-Chi, L. Steven, P. Lawrence i N. Chiu-Shing, „Accurate Distance Estimation Using Camera Orientation Compensation Technique for Vehicle Driver



- Assistance System,“ u *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2012.
- [257] S. H. Qi, J. Li, Z. P. Sun, J. T. Zhang i Y. Sun, „Distance Estimation of Monocular Based on Vehicle Pose Information,“ *Journal of Physics: Conference Series*, t. 1168, pp. 1-8, 2019.
- [258] S. Tuohy, D. O’Cualain, E. Jones i M. Glavin, „Distance Determination for an Automobile Environment using Inverse Perspective Mapping in OpenCV,“ u *ISSC 2010, UCC*, 2010.
- [259] R. Adamshuk, D. Carvalho, J. H. Neme, E. Margraf, S. Okida, A. Tusset, M. M. Santos, R. Amaral, A. Ventura i S. Carvalho, „On the Applicability of Inverse Perspective Mapping for the Forward Distance Estimation based on the HSV Colormap,“ u *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2017.
- [260] M. Rezaei, M. Terauchi i R. Klette, „Robust Vehicle Detection and Distance Estimation Under Challenging Lighting Conditions,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, t. XX, br. X, pp. 1-20, 2015.
- [261] M. Diaz-Cabrera, P. Cerri i P. Medici, „Robust real-time traffic light detection and distance estimation using a single camera,“ *Expert Systems with Applications*, t. 42, pp. 3911-3923, 2015.
- [262] F. Gökçe, G. Üçoluk i S. K. E. Şahin, „Vision-based detection and distance estimation of micro unmanned aerial vehicles,“ *Sensors*, t. 15, pp. 23805-23846, 2015.
- [263] M. A. Haseeb, J. Guan, D. Ristić-Durrant i A. Gräser, „DisNet: A novel method for distance estimation from monocular camera,“ u *10th Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles (PPNIV18), IROS*, 2018.
- [264] J. Mrovlje i D. Vrančić, „Distance measuring based on stereoscopic pictures,“ u *9th International PhD Workshop on Systems and Control: Young Generation Viewpoint*, Izola, Slovenia, 2008.
- [265] M. Mahammed, A. I. Melhum i F. A. Kochery, „Object distance measurement by stereo vision,“ *International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT)*, t. 2, br. 2, pp. 05-08, 2013.

- [266] D. Font, T. Pallejà, M. Tresanchez, D. Runcan, J. Moreno, D. Martínez, M. Teixidó i J. Palacín, „A Proposal for Automatic Fruit Harvesting by Combining a Low Cost Stereovision Camera and a Robotic Arm,“ *Sensors*, t. 14, pp. 11557-11579, 2014.
- [267] C. Holzmann i M. Hochgatterer, „Measuring distance with mobile phones using singlecamera stereo vision,“ u *32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2012.
- [268] Y. S. Suh, N. H. Q. Phuong i H. J. Kang, „Distance Estimation Using Inertial Sensor and Vision,“ *International Journal of Control, Automation, and Systems*, t. 11, br. 1, pp. 211-215, 2013.
- [269] S. Solak i E. D. Bolat, „A new hybrid stereovision-based distance-estimation approach for mobile robot platforms,“ *Computers and Electrical Engineering*, t. 67, pp. 672-689, 2018.
- [270] R. Hartley i A. Z. A, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, New York, USA: Cambridge University Press, , 2004.
- [271] V. Mitrović, *Praćenje objekata kod mašinske vizije kao podrška upravljanju robotom*, Master rad, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, 2017.
- [272] P. Subašić, *Fazi logika i neuronske mreže*, Beograd: Tehnička knjiga, 1997.
- [273] Y. Bai, H. Zhuang i D. Wang, *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, 2006: Springer-Verlag, 2006.
- [274] M. Pavlović, M. Milošević, V. Pavlović, M. Tomić i Ž. Čojbašić, „Fuzzy Control of Modeled Inverted Pendulum,“ u *XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, Niš, Serbia, 2012.
- [275] D. Teodorović, „Fuzzy logic systems for transportation engineering the state,“ *Transportation Research Part A*, t. 33, pp. 337-364, 1999.
- [276] M. B. Simonović, *Primena veštačkih neuronskih mreža za kratkoročno predviđanje i analizu sistema daljinskog grejanja*, Niš: Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, 2016.
- [277] B. Milutinović, P. Djekić, M. Pavlović i M. Tomić, „Artificial Neural Network for Prediction of the Beginning of Delaminaton at Rubber Conveyor Belts,“ u *13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering*, Banja Luka, The Republic of Srpska, 2017.

- [278] H. L. Tsoukalas i E. R. Uhrig, *Fuzzy and neural approaches in engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [279] R. Beale i T. Jackson, *Neural Computing – An Introduction*, Institute of Physics Publishing, 1990.
- [280] A. Cichocki i R. Unbehauen, *Neural Network for Optimization and Signal Processing*, Wiley, 1993.
- [281] H. Shahabi, S. Khezeri, B. B. Ahmad i H. Zabihi, „Application of Artificial Neural Network in Prediction of Municipal Solid Waste Generation (Case Study: Saqqez City in Kurdistan Province),“ *World Applied Sciences Journal*, t. 20, br. 2, pp. 336-343, 2012.
- [282] M. Simonović, V. Nikolić, I. Ćirić i E. Petrović, „Recurrent Neural Network Short-term Prediction of District Heating System in Transient Regimes,“ u *12. International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology*, Banja Luka, The Republic of Srpska, 2015.
- [283] S. Shanmuganathan i S. Samarasinghe, *Artificial Neural Network Modelling*, Springer, 2016.
- [284] I. Ćirić, Ž. Ćojbašić, M. Tomić, M. Pavlović i V. Pavlović, „Computationally Intelligent Object Recognition for DaNI Robot Vision,“ u *XI International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements*, Niš, Serbia, 2012.
- [285] I. Ćirić, Ž. Ćojbašić, M. Tomić, M. Pavlović, V. Pavlović, I. Pavlović i V. Nikolić, „INTELLIGENT CONTROL OF DaNI ROBOT BASED ON ROBOT VISION AND OBJECT RECOGNITION,“ *FACTA UNIVERSITATIS Series: Automatic Control and Robotics*, t. 11, br. 2, pp. 129-140, 2012.
- [286] R. Jovanović, A. Sretenović i B. Živković, „Predviđanje potrošnje toplote u univerzitetskom kampusu korišćenjem neuronske mreže,“ u *Zbornik Međunarodnog kongresa o KGH 45.1*, 2019.
- [287] D. Ristić-Durrant, I. Ćirić, M. Simonović, V. Nikolić, A. Leu i B. Brindić, „Towards Autonomous Obstacle Detection in Freight Railway,“ u *XVII Scientific-Expert Conference on Railways RAILCON '16*, Niš, Serbia, 2016.



- [288] M. Pavlović, I. Ćirić, V. Nikolić, M. Simonović, D. Stamenković i J. Stevanović, „Application of Machine Vision Systems for Autonomous Train Operation,“ u *XXVII MHTK „ADII-2019”*, Sozopol, Bulgaria, 2019.
- [289] J. Pieriegud, „Digital Transformation of Railways,“ Siemens Sp. z o.o., 2018.
- [290] Shift2Rail Joint Undertaking, *Multi-Annual Action Plan*, 2015.
- [291] M. Banić, D. Stamenković, A. Miltenović, M. Simonović i m. Milošević, „Design of Housing and Vibration Suppression for Obstacle Detection System in Railways,“ *XXIV. MEDZINARODNA KONFERENCIA SUCASNE PROBLEMY V KOLAJAVYCH VOZIDLACH, DIEL I*, pp. 23-32, 2019.
- [292] [Na mreži]. Available: <https://www.theimagingsource.com/products/zoom-autofocus-cameras/gige-color-zoom-cameras/dfkz12gp031/>. [Poslednji pristup 31 5 2020].
- [293] [Na mreži]. Available: <https://www.sick.com/ag/en/detection-and-ranging-solutions/3d-lidar-sensors/ld-mrs/ld-mrs400001s01/p/p251942>. [Poslednji pristup 31 5 2020].

## 9. Popis slika

Slika 2.1 Anatomija oka.....	12
Slika 2.2 Funkcionalni blok dijagram osnovnog sistema mašinske vizije.....	15
Slika 2.3 Pravougaona (a) i šestougaona mreža (b).....	29
Slika 2.4 Digitalna slika (a), vrste, kolone i piksel (b) .....	30
Slika 2.5 Siva slika sa lokacijama piksela i nivoima intenziteta.....	31
Slika 2.6. Intenziteti piksela u RGB prostoru boja .....	32
Slika 2.7 Jedna od prvih digitalnih slika.....	32
Slika 2.8 Deo elektromagnetnog spektra zračenja – opseg vidljive svetlosti .....	34
Slika 2.9 Akvizicija digitalne slike .....	34
Slika 2.10 Slika Meseca koju je poslala svemirska sonda Ranger 7 .....	37
Slika 2.11 Blok dijagram sa određenim fazama u obradi i analizi slike.....	39
Slika 2.12 Ujednačavanje histograma: originalna slika (a), histogram originalne slike (b), poboljšana slika (c), ujednačeni histogram (d) .....	41
Slika 2.13 Segmentacija sa jednim pragom: originalna slika (a), segmentirana slika (b) .....	44
Slika 2.14 Histogrami slika koji mogu biti segmentirani korišćenjem jednog praga (a) i dva praga (b).....	45
Slika 2.15 Scena sa 6 posebnih regiona (a), RAG date scene (b).....	48
Slika 2.16 Postupak razdvajanja i spajanja regiona .....	50
Slika 2.17 Slika sa ivicama objekta, ivicama refleksije i ivicama senke (a); Slika iste scene pod drugačijim uslovima osvetljenja (b).....	51
Slika 2.18 Idealna reprezentacija modela koračne (a), linijske (b), rampne (c) i krovne ivice (d) i odgovarajući profili nivoa intenziteta .....	52
Slika 2.19 Roberts maska (a), Sobel maska za izračunavanje gradijenta $G_x$ (b) i gradijenta $G_y$ (c).....	54
Slika 2.20 Prewitt maska u $90^\circ$ sukcesivnim rotacijama .....	55
Slika 2.21 Deo elektromagnetnog spektra – opseg infracrvene svetlosti .....	58

Slika 2.22 Termovizijska kamera FLIR E50 sa termogramom na ekranu (a), Blok dijagram sa glavnim delovima termovizijskog sistema (b).....	61
Slika 2.23 Proces merenja - radiometrijski lanac.....	64
Slika 2.24 Šema ICCD kamere .....	68
Slika 2.25 Pojačavač slike: A. Fotoni, B. Elektroni, C. Multiplicirani elektroni, D. Fotoni; 1. Sočivo, 2. Fotokatoda., 3. Mikrokanalna ploča, 4. Fosforni ekran, 5. Fiber optički inverter, 6. Sočivo .....	69
Slika 2.26 Ulazni prozor i fotokatoda (a), Dijagram faktora prenosa ulaznih prozora (b).....	70
Slika 2.27 Princip rada mikrokanalne ploče .....	71
Slika 2.28 Princip rada fosfornog ekrana (a), Izgled pruge i prepreke na pruzi na fosfornom ekranu (b).....	71
Slika 2.29 Kvantna efikasnost različitih fosfornih ekrana (a), Vremena raspadanja (trajanje fluorescencije) različitih fosfornih ekrana (b).....	72
Slika 2.30 Komponente pojačavača slike (a), Pojačavač slike treće generacije HD-1520 kompanije HARDER.digital GmbH (b) .....	74
Slika 2.31 Sistemi noćne vizije: Naočare tip AN/AVS-9 (a), Monokularni Tarsius (b), Osmatrački Trident (c).....	75
Slika 2.32 Fuzija slika: slika dobijena pomoću pojačavača slike (a), fuzirana slika (b), slika dobijena termovizijskom kamerom (c) .....	76
Slika 3.1 Koncept sistema za detekciju potencijalnih prepreka.....	80
Slika 3.2 Tovarni profil.....	80
Slika 3.3 Luksmetar Extech HD450 .....	82
Slika 3.4 Termovizijska kamera FLIR E50 .....	82
Slika 3.5 Lokacija putnog prelaza u gusto naseljenom delu grada .....	83
Slika 3.6 Putni prelaz u dnevnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada .....	83
Slika 3.7 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u dnevnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada: digitalna slika (a), termogram (b) .....	84
Slika 3.8 Putni prelaz u noćnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada .....	84
Slika 3.9 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima – lokacija u gusto naseljenom delu grada: digitalna slika (a), termogram (b) .....	85
Slika 3.10 Lokacija putnog prelaza u industrijskoj zoni grada.....	86
Slika 3.11 Putni prelaz u dnevnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada.....	86



Slika 3.12 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u dnevnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada: digitalna slika (a), termogram (b) .....	87
Slika 3.13 Putni prelaz u noćnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada.....	87
Slika 3.14 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima – lokacija u industrijskoj zoni grada: digitalna slika (a), termogram (b) .....	88
Slika 3.15 Snimanje termovizijskom kamerom FLIR E50 u noćnim uslovima sa objektom na koloseku— lokacija u industrijskoj zoni grada: objekat na rastojanju od 50m - digitalna slika (a), termogram (b); objekat na rastojanju - od 100m digitalna slika (c), termogram (d); objekat na rastojanju od 150m - digitalna slika (e), termogram (f); objekat na rastojanju od 200m - digitalna slika (g), termogram (h) .....	89
Slika 3.16 Detekcija koloseka na lokaciji u gusto naseljenom delu grada: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c) .....	91
Slika 3.17 Detekcija koloseka na lokaciji u industrijskoj zoni grada: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c) .....	91
Slika 3.18 Detekcija koloseka na lokaciji u industrijskoj zoni grada-kamera sa objektivom: termovizijska slika (a), detektovan kolosek (b), detektovan kolosek prikazan zelenom bojom na termovizijskoj slici (c).....	92
Slika 3.19 Termovizijska kamera FLIR model TAU2: sa objektivom (a), bez objektiva (b) 93	
Slika 3.20 Workswell GigE adapter.....	94
Slika 3.21 Termovizijska kamera i Workswell GigE adapter (a), povezivanje termovizijske kamere i adaptera (b) .....	94
Slika 3.22 Lokacija putnog prelaza u blizini sela Babin Potok .....	95
Slika 3.23 Putni prelaz u blizini sela Babin Potok u dnevnim uslovima .....	96
Slika 3.24 Okolina koloseka (a), Okolina putnog prelaza i lokalni put (b) .....	96
Slika 3.25 Postavljanje opreme na lokaciji Babin Potok .....	97
Slika 3.26 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok: termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f) .....	98
Slika 3.27 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario sa objektima (a) termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f) .....	100
Slika 3.28 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario sa objektima velikim rastojanjima: 625 m (a), 750 m (b), 850 m (c), 935 m (d).....	102

Slika 3.29 Lokacija Babin Potok: snežni pokrivač na (a) i u okolini koloseka (b), formiranje magle u toku dana (c) i u sumrak (d), magla i snežni pokrivač na i u okolini koloseka u noćnim uslovima (e) .....	103
Slika 3.30 Lokacija Babin Potok; vidljivost putnog prelaza, sa uključenim uređajima za osvetljavanje, sa rastojanja od 50m (a) i 150m (b) .....	104
Slika 3.31 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario u lošim vremenskim uslovima: termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f)..	105
Slika 3.32 Detekcija koloseka na lokaciji Babin Potok – scenario u lošim vremenskim uslovima i prisustvom objekata na koloseku: termovizijska slika (a), Roberts (b), Sobel (c), Prewitt (d), Canny (e) i LoG (f) .....	107
Slika 3.33 Lokacija putnog prelaza u blizini sela Žitorađa.....	108
Slika 3.34 Putni prelaz na lokaciji Žitorađa u dnevnim uslovima: prilazni put (a), putni prelaz (b) .....	109
Slika 3.35 Postavljanje sistema na lokaciji Žitorađa – termovizijska kamera: dnevni uslovi (a), noćni uslovi (b) .....	110
Slika 3.36 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa-prvi scenario: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c), detektovan kolosek na termovizijskoj slici (d) .....	111
Slika 3.37 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa-drugi scenario: digitalna slika (a), termovizijka slika (b), detektovan kolosek (c), detektovan kolosek na termovizijskoj slici (d) .....	112
Slika 3.38 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa-treći scenario: digitalna slika (a), termovizijska slika (b), detektovan kolosek (c), detektovan kolosek na termovizijskoj slici (d) .....	113
Slika 3.39 Ilustracija koloseka i regiona od interesa.....	114
Slika 3.40 Detekcija objekata na lokaciji u industrijskoj zoni grada: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d) .....	116
Slika 3.41 Detekcija objekata na lokaciji u industrijskoj zoni grada-kamera sa objektivom: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	117





Slika 3.42 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	119
Slika 3.43 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom na rastojanju od 625m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	120
Slika 3.44 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom na rastojanju od 750m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	121
Slika 3.45 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom na rastojanju od 850m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	122
Slika 3.46 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom na rastojanju od 935m: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	123
Slika 3.47 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario u lošim vremenskim uslovima: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	125
Slika 3.48 Detekcija objekata na lokaciji Žitorada-scenario sa više objekata: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	126
Slika 3.49 Detekcija objekata na lokaciji Žitorada-scenario sa jednim objektom na velikom rastojanju: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek i objekat na termovizijskoj slici (d).....	127
Slika 3.50 Detekcija objekata na lokaciji Babin potok-scenario sa objektom van regiona od interesa: termovizijska slika (a), region od interesa (b), segmentirana slika (c), detektovan samo kolosek na termovizijskoj slici (d).....	128
Slika 3.51 Blok dijagram detekcije termovizijskim sistemom .....	129
Slika 3.52 Sistem noćne vizije.....	130
Slika 3.53 CMOS kamera .....	132
Slika 3.54 Blok dijagram detekcije sistemom noćne vizije .....	133
Slika 3.55 Postavljanje sistema na lokaciji Žitorada – sistem noćne vizije: dnevni uslovi (a), noćni uslovi (b) .....	133



Slika 3.56 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa – prvi scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d).....	134
Slika 3.57 Detekcija objekata na lokaciji Žitorađa – objekat na rastojanju od 50 m: region od interesa na originalnoj NV slici (a), segmentirana slika (b), detektovan kolosek i objekat na originalnoj NV slici (c).....	135
Slika 3.58 Detekcija koloseka na lokaciji Žitorađa – objekat na 100 m: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d).....	136
Slika 3.59 Detekcija objekata na lokaciji Žitorađa – objekat na rastojanju od 50 m: region od interesa na originalnoj NV slici (a), segmentirana slika (b), detektovan kolosek i objekat na originalnoj NV slici (c).....	137
Slika 3.60 Scenario bez objekata: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od intetesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d) .....	138
Slika 3.61 Scenario sa objektom sa unutrašnje strane desne šine: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d) .....	139
Slika 3.62 Scenario sa objektom sa spoljašnje strane desne šine: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od intetesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d) .....	140
Slika 3.63 Scenario sa objektom na koloseku između šina: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d).....	141
Slika 3.64 Scenario sa objektom sa spoljašnje strane leve šine: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d) .....	142
Slika 3.65 Scenario sa objektom na levoj šini: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d).....	143
Slika 3.66 Scenario sa objektima na koloseku između šina: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d).....	144



Slika 3.67 Scenario sa objektima na i van koloseka: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d).....	145
Slika 3.68 Scenario sa objektima van koloseka: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), region od interesa (c), rezultati detekcije na originalnoj NV slici (d).....	146
Slika 3.69 Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – objekti na rastojanju od 100 m: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g).....	148
Slika 3.70 Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – objekti na rastojanju od 150 m: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g).....	150
Slika 3.71 Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – prvi scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g).....	152
Slika 3.72 Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – drugi scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g).....	153
Slika 3.73 Detekcija koloseka i objekata na lokaciji Babin Potok – treći scenario: originalna NV slika (a), NV slika posle ekvilizacije histograma (b), segmentirana slika-kolosek (c), detektovan kolosek na originalnoj NV slici (d), region od interesa (e), segmentirana slika-objekti (f), detektovan kolosek i objekti na originalnoj NV slici (g).....	154
Slika 4.1 Struktura genetskog algoritma.....	158
Slika 4.2 Najbolja i srednja vrednost funkcije cilja – visoka vrednost praga.....	161
Slika 4.3 Prosečna udaljenost između jedinki – visoka vrednost praga.....	162
Slika 4.4 Primena genetskog algoritma za određivanje vrednosti visokog praga: originalna termovizijska slika (a), detektovan kolosek (b).....	162
Slika 4.5 Najbolja i srednja vrednost funkcije cilja – obe vrednosti praga.....	164
Slika 4.6 Prosečna udaljenost između jedinki – obe vrednosti praga.....	164



Slika 4.7 Primena genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti niskog i visokog praga: originalna termovizijska slika (a), detektovan kolosek (b).....	165
Slika 5.1 Slika sa kolosekom - projektivna distorzija.....	172
Slika 5.2 Lokacija Babin Potok: Scenario za ocenu rastojanja.....	174
Slika 5.3 Lokacija Babin Potok: Pozicija termovizijske kamere u odnosu na kolosek.....	174
Slika 5.4 Lokacija Babin Potok: Tačke za izračunavanje matrice homografije $H$ (a); ocenjena rastojanja do detektovanih objekata (b).....	174
Slika 5.5 Lokacija Žitorađa: Objekti na koloseku.....	175
Slika 5.6 Lokacija Žitorađa: Pozicija termovizijske kamere u odnosu na kolosek.....	175
Slika 5.7 Lokacija Žitorađa: Tačke za izračunavanje matrice homografije $H$ (a), ocenjena rastojanja do detektovanih objekata (b).....	176
Slika 5.8 Lokacija Babin Potok: Tačke za izračunavanje matrice homografije $H$ za velika rastojanja.....	177
Slika 5.9 Poređenje realnih i rastojanja ocenjenih homografijom.....	179
Slika 5.10 Greška ocene rastojanja homografijom.....	179
Slika 5.11 Lokacija Žitorađa: Pozicija sistema noćne vizije u odnosu na kolosek.....	180
Slika 5.12 Lokacija Žitorađa: Tačke za izračunavanje matrice homografije $H$ – sistem noćne vizije.....	180
Slika 5.13 Lokacija Žitorađa: Ocenjena rastojanja od sredine koloseka do detektovanih objekata – sistem noćne vizije.....	181
Slika 5.14 Lokacija Žitorađa: Tačke za izračunavanje matrice homografije $H$ – sistem noćne vizije.....	181
Slika 5.15 Lokacija Babin Potok: Ocenjena rastojanja od sistem noćne vizije do detektovanih objekata.....	182
Slika 5.16 Blok dijagram FuzzyH sistema.....	185
Slika 5.17 Funkcija pripadnosti prve ulazne promenljive $d_h$ .....	186
Slika 5.18 Funkcija pripadnosti druge ulazne promenljive $y$ i koordinate.....	186
Slika 5.19 Funkcija pripadnosti izlazne promenljive $K_d$ .....	186
Slika 5.20 Poređenje realnih i rastojanja ocenjenih FuzzyH sistemom.....	190
Slika 5.21 Greška ocene rastojanja FuzzyH sistemom.....	190
Slika 5.22 Ocena rastojanja na lokaciji Babin Potok: najmanja (a) i najveća greška ocene (b).....	191
Slika 5.23 Model neurona.....	192



Slika 5.24 MLP neuronska mreža.....	193
Slika 5.25 Veštačka neuronska mreža za ocenu rastojanja.....	195
Slika 5.26 Ilustracija pozicija termovizijske kamere i objekata na koloseku na opsegu rastojanja od 400 do 950 metara.....	195
Slika 5.27 Mera performansi veštačke neuronske mreže.....	196
Slika 5.28 Stanje izlaza kod učenja veštačke neuronske mreže.....	196
Slika 5.29 Poređenje realnih i rastojanja ocenjenih veštačkom neuronskom mrežom .....	198
Slika 5.30 Greška ocene rastojanja veštačkom neuronskom mrežom .....	198
Slika 5.31 Uporedni prikaz greške ocene rastojanja primenom tri metode .....	201
Slika 6.1 Nivoi automatizacije i upravljanja železničkim vozilom .....	203
Slika 6.2 3D model integrisanog sistema za detekciju potencijalnih prepreka.....	204
Slika 6.3 RGB kamera model DFK Z12GP031 .....	204
Slika 6.4 Laserski skener model LD-MRS400001S01 .....	205
Slika 6.5 Elementi integrisanog sistema za detekciju potencijalnih prepreka.....	205
Slika 6.6 Integrisani sistem za detekciju potencijalnih prepreka postavljen na terenu.....	206



## 10. Popis tabela

Tabela 2.1 Poređenje karakteristika ljudskog vida i mašinske vizije .....	16
Tabela 2.2 Karakteristike fosfornih ekrana P43 i P46 .....	72
Tabela 4.1 Parametri genetskog algoritma za određivanje vrednosti visokog praga.....	161
Tabela 4.2 Parametri genetskog algoritma za određivanje optimalnih vrednosti niskog i visokog praga.....	163
Tabela 5.1 Rezultati ocene rastojanja homografijom – lokacija Babin Potok.....	175
Tabela 5.2 Rezultati ocene rastojanja homografijom – lokacija Žitorada .....	176
Tabela 5.3 Rezultati ocene rastojanja homografijom u opsegu 400 – 950 m - Lokacija Babin Potok .....	178
Tabela 5.4 Rezultati ocene rastojanja homografijom na lokaciji Babin Potok – sistem noćne vizije.....	183
Tabela 5.5. Pojedina fazi pravila iz baze hibridnog FuzzyH sistema .....	186
Tabela 5.6 Rezultati ocene rastojanja FuzzyH sistemom u opsegu 400 – 950 m - Lokacija Babin Potok.....	189
Tabela 5.7 Rezultati ocene rastojanja veštačkom neuronskom mrežom u opsegu 400 – 950 m - Lokacija Babin Potok.....	197
Tabela 5.8 Greške ocene rastojanja primenom tri metode.....	200



## **11. Biografija autora**

Milan Pavlović je rođen 18.9.1986. godine u Nišu. Završio je osnovnu školu „Sveti Sava” i Gimanziju „Svetozar Marković”, obe u Nišu. Mašinski fakultet u Nišu je upisao 2005. godine. Master studije je završio 2010. godine na profilu Mehatronika sa prosečnom ocenom 9 u toku studija i ocenom 10 na master radu. U toku studija je učestvovao u realizaciji studentskih projekata „Primarno sortiranje otpada”, „Eco-Workshop” i „Wont 2”, koji su finansirani od strane DIN „Fabrika Duvana Niš” koja posluje u sastavu kompanije Phillip Morris International.

Dalje usavršavanje nastavio je upisom na doktorske akademske studije 2010. godine na Mašinskom fakultetu u Nišu, u okviru uže naučne oblasti Mehatronika i upravljanje sistemima. Kao stipendista Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, od 2010. - 2014. godine, bio je aktivno angažovan u realizaciji projekta „Istraživanje i razvoj nove generacije vetrogeneratora visoke energetske efikasnosti”, ev. broj TR 35005. Učestvovao je u realizaciji više domaćih i međunarodnih projekata.

Od 2014. godine, zaposlen je kao asistent na Visokoj tehničkoj školi strukovnih studija u Nišu. Autor je i koautor većeg broja naučnih i stručnih radova.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

**„Примена интелигентних система машинске визије код аутономног  
управљања железничким возилима”**

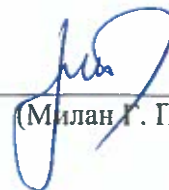
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 30.6.2020.

Потпис аутора дисертације:



(Милан Г. Павловић)



**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације:

**„Примена интелигентних система машинске визије код аутономног  
управљања железничким возилима”**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 30.6.2020.

Потпис аутора дисертације:

  
\_\_\_\_\_  
(Милан Г. Павловић)

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

**„Примена интелигентних система машинске визије код аутономног управљања железничким возилима”**

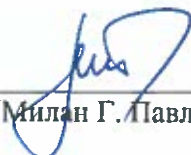
Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 30.6.2020.

Потпис аутора дисертације:

  
\_\_\_\_\_  
(Милан Г. Павловић)