UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Nikola M. Slavković

Detekcija promene sastava i geometrije puta obradom izmerenih parametara za potrebe kategorizacije putne infrastrukture

Doktorska disertacija

Beograd, 2020. godine

UNIVERSITY OF BELGRADE

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nikola M. Slavković

Detection of Road Structure Composition and Geometry Changes by Processing Measured Parameters, for the Purpose of Road Network Categorization

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2020.

Mentor:

dr Milan Bjelica, vanredni profesor,

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Milan Bjelica, vanredni profesor,

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Mirjana Simić Pejović, vanredni profesor,

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Vladimir Čeperić, docent,

Univerzitet u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

dr Predrag Pejović, redovni profesor,

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Ana Gavrovska, docent

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane:

Detekcija promene sastava i geometrije puta obradom izmerenih parametara za potrebe kategorizacije putne infrastrukture

Rezime:

U ovoj disertaciji razvijen je algoritam za predikciju rizika proklizavanja vozila, čime je omogućeno mapiranje rizičnih zona duž putne infrastrukture. Predloženim algoritmom se realizuju automatska detekcija i prepoznavanje finih promena sastava i geometrije putne površi. Ovo se zasniva na obradi teksture slike dobijene skeniranjem puta, iz specijalnog vozila koje se kreće kolovoznom trakom duž deonice putne mreže. Merni podaci prikupljeni su upotrebom multisenzorske platforme montirane na vozilo.

Ovakav pristup analizi putne infrastrukture ima za cilj adekvatnu i blagovremenu reakciju na promene stanja površi puta, koje nisu vidljive golim okom od strane direktnih učesnika u saobraćaju. Ovo je od posebnog značaja i za potrebe službi koje se bave održavanjem puteva i sanacijom oštećenja.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata i obradom izmerenih parametara, razvijen je i predstavljen algoritam čiji je glavni cilj predviđanje rizika i lokalizacija regiona potencijalnih saobraćajnih nezgoda koje mogu nastati kao posledica proklizavanja vozila sa putne površi.

U pogledu strukturnog kvaliteta, putna površ se najčešće opisuje svojom teksturom. Njena geomerijska svojstva direktno utiču na druge činioce bezbednosti u saobraćaju, kao što su interakcija pneumatika sa površinskim slojem puteva, odvođenje tj. drenaža vode i otpornost na proklizavanje. U osnovi razvoja pomenutog algoritma urađene su analize jednodimenzionalnih i dvodimenzionalnih signala dobijenih uređajima za beskontaktno skeniranje. Akvizicija jednodimenzionalnih signala vršena je na osnovu interakcije koherentne svetlosti sa površinskim materijalima puta, upotrebom laserskog profilometra. Dvodimenzionalni signal je dobijen upotrebom video-kamere kojom je snimana putna površ. Oba dijagnostička pristupa realizovana su uređajima sa istog specijalnog vozila.

U ovoj disertaciji je najpre potvrđena multifraktalna priroda profila putne površi, čime je dokazana mogućnost primene multifraktalnog pristupa u analizi teksture puta, koja se pokazala kao veoma pouzdan alat za detekciju i lokalizaciju granulometrijskih promena na putnoj površi. Rezultati multifraktalne analize su iskorišćeni kao potvrda stohastičke prirode jednodimenzionalnog signala, i pretpostavka da dvodimenzionalni signal pripada sličnoj familiji slučajnih/pseudoslučajnih vremenskih serija.

Novi algoritam predikcije rizika, predložen u disertaciji, bazira se na obradi i analizi dvodimenzionalnog signala. Obrada i analiza slike vršena je testiranjem četiri metode za ekstrakciju obeležja teksture: Gaborovom transformacijom, transformacijom talasićima, matricom kopojavljivanja nivoa sivog i obeležjima histograma ivica. Od svih navedenih metoda, primena Gaborove transformacije je pokazala najbolje rezultate. Ekstrakcija vektora obeležja teksture praćena statističkim algoritmima za merenje sličnosti vektora obeležja i selekcija referentnog vektora, dovela je do klasifikacije teksture slike. Sâm algoritam je nadograđen inkorporiranjem istovremenih merenja temperature površine, kako bi se kreirala i validirala finalna klasifikacija finih tekstura površine.

Put je klasifikovan u klase rizika visokog, srednjeg i niskog nivoa, u skladu sa opasnostima od proklizavanja, što je omogućilo formiranje mape rizičnih zona. Algoritam predviđanja rizika je potvrđen

na osnovu podataka o saobraćajnim nezgodama, koje su se desile u periodu od tri sukcesivne godine na istoj deonici puta, pribavljenih iz baze Agencije za bezbednost drumskog saobraćaja Srbije.

Razvijeni algoritam omogućava predikciju lokacija rizičnih zona sa mapiranjem, koje upozoravaju na potencijalne saobraćajne nezgode usled proklizavanja vozila. Može se koristiti kao podrška za navigaciju, autonomnu vožnju, a moguće je unaprediti celu proceduru sa ciljem adekvatne reakcije u realnom vremenu, putem globalne mreže (*IoV - Internet of Vehicles*), koja postaje sastavni deo tzv. pametnih gradova (*smart cities*).

Ovakav pristup analizi putne površi će svakako, u svojoj daljoj primeni, rezultirati u smeru precizne i objektivne klasifikacije i kategorizacije kompletne putne infrastrukture, a sve u pravcu povećanja bezbednosti učesnika u saobraćaju, sa naročitim akcentom na rešenje problema predviđanja rizika na putu za donošenje odluka pri autonomnoj vožnji.

Ključne reči: tekstura površi, obrada slike, ekstrakcija obeležja, temperatura, algoritam za klasifikaciju, analiza rizika, algoritam za predikciju rizika, autonomna vožnja, bezbednost saobraćaja

Naučna oblast: Telekomunikacije

Uža naučna oblast: Veštačka inteligencija

UDK broj:

Detection of Road Structure Composition and Geometry Changes by Processing Measured Parameters, for the Purpose of Road Network Categorization

Abstract:

This dissertation describes the development of an algorithm for predicting the risk of vehicle skidding by mapping high-risk zones along road surfaces. The algorithm enables the automatic detection and recognition of fine changes in the composition and geometry of road surfaces. It is based on image texture processing of the metrics obtained from scanning the road surface using a vehicle-mounted multi-sensory platform.

The objective of this algorithm is to provide the means to a real time response to invisible to the bare eye changes in road surface conditions for the benefit of road maintenance and damage repair services, as well as general motorists and autonomously driven vehicles. The algorithm will be capable of being used to identify and assess the accident risk posed by inadequate and compromised road surfaces that potentiate the possibility of vehicles skidding and sliding.

In terms of structural quality, road surface is most often described according to its texture. Its geometric properties have a direct impact on other road safety factors, such as interaction with vehicle tires, water drainage and skid resistance. The development of the algorithm was based on analysis of one-dimensional and two-dimensional signals obtained by contactless scanning devices. The acquisition of one-dimensional signals was performed with a laser profiler, and the two-dimensional signal was obtained with a combination of a video camera and a surface temperature sensor. All diagnostic devices were mounted on the same special vehicle.

For this research, the multifractal nature of the road surface profile was firstly confirmed, thus proving the feasibility of applying a multifractal approach to analyze road texture. This has proven to be a very reliable tool for detecting and locating real changes in the geometry of road surfaces. The results of multifractal analysis were used to confirm the stochastic nature of the one-dimensional signal, and the assumption that the two-dimensional signal belongs to a similar family of random / pseudorandom time series. The new risk prediction algorithm proposed in this dissertation is based on processing and analyzing a two-dimensional signal.

Image processing and analysis were tested by comparing four texture extraction methods: Gabor transform, wavelet transform, gray level co-occurrence matrix and edge histogram descriptor. Of all the above methods, the Gabor transform produced the best results. Texture feature vector extraction, followed by statistical algorithms to measure feature vector similarity and reference vector selection, led to the classification of the image texture. The algorithm itself has been upgraded by incorporating simultaneous surface temperature measurements to create and validate the final classification of fine surface textures. The road was classified into high, medium and low level risk areas according to skid hazard, which enabled the formation of a map of risk zones. The algorithm for risk prediction was validated on the basis of traffic accidents which occurred over three successive years on the same section of road, information for which was obtained from the database of the Road Traffic Safety Agency of Serbia.

The algorithm that has been developed enables risk assessment mapping of dangerous locations. In this way, potential traffic accident sites due to vehicle skidding can be flagged. It could be used as a support for navigation or for autonomous driving. The entire procedure could be improved and updated by integrating real time responses through the global network (Internet of Vehicles - IoV), to become an integral part of so-called smart cities.

The approach to road surface analysis described in this research paper could potentially be applied to the precise and objective classification and categorization of the entire road surface infrastructure. Road safety could be increased, with particular emphasis on solving the risk prediction problems for decision making for autonomous driving.

Keywords: surface texture, image processing, feature extraction, temperature, classification algorithm, risk analysis, prediction algorithm, autonomous driving, road safety.

Scientific area: Telecommunications

Specific scientific area: Artificial intelligence

UDC number:

... sinu Maksimu, zato što će, jednostavno, biti...

... supruzi Ani, zato što, jednostavno, jeste…

... blagopočivšoj majci Branki, zato što je, jednostavno, bila…

Zahvalnica

U akademskoj zajednici se neretko šapuće da se pisanje doktorata nikada ne završava, ono se samo prekida.

Ovim putem u etar šaljem jedno ogromno hvala svima koji su pomogli da istrajem u ovom procesu:

Prof. dr Milanu Bjelici, mentoru, na vremenu, posvećenosti, trudu i podršci u svim fazama istraživanja koja su prethodila, i aktivnostima koje su doprinele konačnom izgledu ove disertacije.

Profesorima, članovima Komisije koji su korisnim savetima učinili onaj završni, fini korak.

Prof. dr Irini Reljin i prof. dr Branimiru Reljinu, koji su u svakom trenutku podržavali moj naučno istraživački rad.

Dr Goranu Zajiću na nesebičnoj matematičko tehničkoj saradnji u procesu obrade signala.

Zoranu Drobnjaku i Dušanu Ilkiću, na realizaciji eksperimentalne postavke i ustupanju baze podataka JP Putevi Srbije.

Nikoli Galoviću (Centar za motorna vozila, AMSS), za stručnu pomoć u analizi i realizaciji metoda za akviziciju podataka.

Jovanu Raduloviću na stručnom lektorisanju i pravopisnim sugestijama.

Ani Slavković na svesrdnoj i bezrezervnoj podršci, i na najvećem doprinosu da ova ideja jednom zaista postane stvarnost.

SADRŽAJ

1. UVOD ... 1

1.1 POLAZNE HIPOTEZE ... 4
1.2 METODE ISTRAŽIVANJA ... 5
1.3 NAUČNI DOPRINOSI ... 5
1.4 REALIZACIJA ISTRAŽIVANJA ... 6
1.5 PREGLED SADRŽAJA DOKTORSKE DISERTACIJE ... 6

2. PROBLEM PREDIKCIJE RIZIČNIH ZONA PUTA ... 8

2.1 KVALITET PROFILA PUTNE POVRŠI I PROBLEM OTPORNOSTI NA PROKLIZAVANJE ... 20
2.2 AUTONOMNA VOŽNJA, SIGURNOST I PERSPEKTIVE ... 21

3. PREGLED POSTOJEĆE LITERATURE ... 27

4. ALGORITAM ZA KLASIFIKACIJU PUTNE POVRŠI ZASNOVAN NA MULTIFRAKTALNOJ ANALIZI MAKROTEKSTURE ... 37

4.1 MULTIFRAKTALNI OKVIR ... 40
4.2 AKVIZICIJA PODATAKA ... 42
4.3 LEŽANDROV PRISTUP ZA KLASIFIKACIJU MAKROTEKSTURE ... 44
4.4 KLASIFIKACIJA POVRŠINE PUTA BAZIRANA NA MULTIFRAKTALNOM PRISTUPU VELIKIH DEVIJACIJA ... 53
4.4.1 Metodologija klasifikacije makroteksture ... 54
4.4.2 Diskusija ... 55

5. ALGORITAM PREDVIĐANJA RIZIKA I MAPIRANJE PUTA ... 57

5.1 TEORIJSKI UVOD ... 57
5.2 METODOLOGIJA ... 59
5.3 EKSPERIMENTALNA POSTAVKA ... 60
5.4 KARAKTERIZACIJA TEKSTURE ... 61
5.4.1 Ekstrakcija obeležja teksture ... 61
5.4.1.1 Gaborova transformacija ... 61
5.4.1.2 Matrica zajedničkih pojavljivanja nivoa sivog ... 65
5.4.1.3 Histogram prepoznavanja ivice objekata ... 67
5.4.1.4 Ekstrakcija obeležja talasićima ... 68
5.4.2 Merenje sličnosti vektora obeležja ... 71
5.4.2.1 Euklidsko rastojanje – *d*. ... 71
5.4.2.2 Korelacija - *R*. ... 72
5.4.2.3 Normalizovana srednja razlika- *D* ... 72
5.4.3 Klasifikacija vektora obeležja ... 77
5.5 AKVIZICIJA PODATAKA O TEMPERATURI PUTNE POVRŠI ... 77
5.6 REZULTATI I DISKUSIJA ... 77
5.7 PREDIKCIJA RIZIKA NA PUTEVIMA NA OSNOVU KLASIFIKACIJE FINE TEKSTURE PUTA ... 85

6. ZAKLJUČAK ... 88

LITERATURA ... 90

"Road safety is an issue that does not receive anywhere near the attention it deserves – and it really is one of our great opportunities to save lives around the world".

"Bezbednost na putevima je pitanje koje ne dobija ni približno onu pažnju koju zaslužuje – a, to je, zaista, jedna od naših velikih prilika da spasemo živote širom sveta."

Michael R. Bloomberg

Ambasador Svetske zdravstvene organizacije
za neepidemijske bolesti i telesne povrede, 2019.

1. Uvod

U aktuelnim nacionalnim i internacionalnim programima za realizaciju povećanja bezbednosti učesnika u saobraćaju, jedno od najznačajnijih mesta zauzima ocena geometrijsko-strukturalnih karakteristika puta [1-7]. Ovo se u najvećoj meri odnosi na parametre kojima se opisuje stanje putne površi. Njen kvalitet najviše zavisi od osobina materijala koji čine površinski sloj (mešavine asfalta, cementa, betona, bitumena i drugih kompozita različitih površinskih granulata i agregatnog sastava). Kvalitet putne površi ispoljava se kroz činioce bezbednosti, od kojih su najvažniji trenje između pneumatika i kolovoza, otpornost na proklizavanje vozila, drenaža vode i stepen degradacije površinskog sloja, i to su faktori koji na infrastrukturnim aktivnostima, diktiraju uslove za povećanje sigurnosti učesnika u sabraćaju.

Prema podacima Svetske zdravstvene organizacije – SZO (*WHO – World Health Organization*), svake godine, usled saobraćajnih nezgoda, život izgubi oko 1,25 miliona ljudi, dok se predviđa da će godišnji broj smrtnih slučajeva na putevima širom sveta do 2030. godine, porasti na oko 2,4 miliona [1, 2].

Na osnovu toga, Ujedinjene nacije su 2010. godine objavile Globalni plan za Dekadu akcije za bezbednost na putevima 2011-2020 [2]. Plan podstiče države i zainteresovane strane da sprovode aktivnosti koje doprinose smanjenju prognozirane stope smrtnosti na putevima. Glavne aktivnosti za povećanje sigurnosti na putevima, predložene u Planu kao oblasti u žiži interesovanja, jesu: izgradnja kapaciteta za upravljanje bezbednošću na putevima; poboljšanje bezbednosti putne infrastrukture i širih transportnih mreža; dalji razvoj sigurnosti i automatizacija samih vozila; poboljšanje ponašanje učesnika u saobraćaju uz psihofizički faktor; poboljšanje nege povređenih nakon nezgode. Fokusirajući se na aktivnost za poboljšanje putne infrastrukture, sve zemlje treba da budu u stanju da procene bezbednosni kapacitet putne mreže za svoje korisnike i da dalje razvijaju infrastrukturu kroz ciljane investicione programe. Evropska direktiva 2008/96/EC o upravljanju infrastrukturom za povećanje bezbednosti saobraćaja postavila je zahteve za upravljanje sigurnošću u transevropskoj putnoj mreži, koji uključuju inspekciju sigurnosti na putevima, rangiranje sigurnosti i reviziju stanja, predlažući ulaganja u deonice

puteva sa najvećim brojem saobraćajnih nezgoda i najvećim potencijalom za smanjenje broja nezgoda i udesa [2,3].

Većina ovakvih i sličnih programa zasniva se na statistikama o broju saobraćajnih nezgoda koje su se već dogodile na deonicama puta od interesa za ocenu ili kategorizaciju.

Najnoviji protokoli i metode za ocenu stanja putne infrastrukture, na prvom mestu kvaliteta i geometrije površinskih slojeva, zasnovani su na angažovanju specijalnih vozila koja su opremljena složenim multisenzorskim platformama, sa ciljem kontinualog, preciznog i verodostojnog prikupljanja podataka direktno sa terena [7,8]. Najčešći senzorski uređaji za dijagnostiku stanja putne infrastrukture, jesu laserski profilometri, daljinski, beskontaktni merači temperature i vlažnosti putne površi i okoline, daljinomeri, ultrazvučni i elektromagnetski detektori metala i metalnih legura ispod nivoa saobraćajnica, video- kamere, audio-detektori za merenje buke i zvučnog pritiska i drugi [6,7].

Jedan od glavnih atributa za strukturalni opis neke površi jeste njena tekstura. Promena teksture može ukazati na suštinske promene strukture materijala koji čini površinski sloj objekta od interesa. Kvalitet putne površi se određuje ocenom njene teksture. Tekstura puta se najčešće opisuje preko granulometrijskog sastava površinskog sloja, koji se odnosi na oblik, hrapavost, veličinu i raspored agregata – čestica koje strukturno čine tu površ [4].

Do današnjeg dana, podaci o teksturi površine puta analizirani su različitim alatima, kroz različite pristupe, uz najčešće korišćenje statističke analize zasnovane na linearnim i/ili nelinearnim metodama u zavisnosti od prirode dobijenih signala. Osnovna svrha je bila matematičko modeliranje, interpretacija i karakterizacija površine puta i drugih činilaca koji utiču na opšte stanje putne površi [7]. Te analize bavile su se i uticajem strukture i kvaliteta puta na sve faktore bezbednosti saobraćaja, koji nastaju kao posledica kvaliteta površinskog sloja puta.

U ovoj disertaciji predstavljen je algoritam predikcije rizika proklizavanja vozila, koji se zasniva na ekstrakciji teksture slike, dobijene pomoću mobilnog sistema za skeniranje putne površi [5]. Početna faza istraživanja zasnovana je na analizi jednodimenzionalnih (1D) podataka. Vrši se ocena stanja, nelinearnim analizama za detekciju i lokalizaciju problema i promena, tj. obradom 1D signala dobijenog laserskim profilometrom. Zatim je predložen i opisan novi algoritam koji se zasniva na obradi i analizi dvodimezionalnih (2D) signala. U tom smislu se primenjuje kamera u pokretu, kao veoma korisna tehnika za analizu teksture površi puta. Ovo je naročito značajno u slučajevima finih promena putne površi, kada ne postoje očigledna vidljiva oštećenja kao što su pukotine, rupe i zakrpe. Pokazano je da je moguće analizirati teksturu površine na nivou geometrije agregata koji čine površinski sloj puta. Klasifikacija putne površi, na osnovu podataka dobijenih akvizicijom signala sa video-kamere u pokretu, validiranih simultano merenom temperaturom putne površi, do sada nije istraživana na ovaj način.

Sa ciljem povećanja bezbednosti učesnika u saobraćaju, u poslednjih nekoliko godina intenzivirane su međunarodne aktivnosti koje imaju za cilj postavljanje i usvajanje preporuka i standarda iz ove oblasti [4, 7-11]; u njima se, između ostalog, jednoznačno definišu parametri kvaliteta puteva, čak i njihove bliske okoline.

Međunarodnom standardizacijom i odgovarajućom regulativom utvrđeni su sistemi ocenjivanja i kasnije kategorizacije puteva, zasnovanih na skeniranju i dijagnostici puteva pomoću opreme koja, dalje, omogućava prikupljanje podataka o strukturi slojeva samog kolovoza, kao i slojeva iznad i ispod njegove površi [9, 10].

Publikovane metodologije za skeniranje i dijagnostiku puteva mogu se podeliti u tri grupe [9-11].

Prvu grupu čine sistemi koji omogućavaju snimanje puteva i okoline primenom najčešće video-kamera, različitih tehničkih karakteristika, prema željenom tipu ulaznih/izlaznih podataka. [12].

Akvizicija dvodimenzionalnog signala do sada je, uglavnom, omogućavala analizu površi samog kolovoza, u smislu promena agregatnog sastava i stepena granulacije teksture, preko krupnijih defekata koji se mogu detektovati na površi, do degradacija tipa udarnih rupa i oštećenja koja značajno degradiraju strukturu puta, ne samo njegovog površinskog, već i drugih slojeva koji ga zajedno čine upotrebljivim za bezbedan saobraćaj putnika i robe.

Drugu grupu čine sistemi koji omogućavaju skeniranje sastava i strukture ispod nivoa kolovoza [9]. Obradom ovakvog signala dobija se slika koja vizualizuje geometrijske i strukturalne karakteristike svih slojeva puta, od asfalta i drugih pokrivajućih materijala, pa do onih na većim dubinama, koji čine podršku cele saobraćajne deonice. U okviru ovih dijagnostičkih istraživanja moguće je locirati i eventualne objekte koji se nalaze ispod površine. Takođe je moguće detektovati i deformacije u samom terenu, a mogu se locirati i podzemni objekti na većim dubinama, energetski i telekomunikacioni kablovi, vodovodne i gasovodne cevi i druge podzemne instalacije, što je od posebnog značaja kada nema dostupnih informacija o takvim objektima u podzemnom katastru i arhivama sličnih institucionalnih registara. Detekcija promena u strukturi autoputeva i saobraćajnica nižeg reda je od izuzetne važnosti za predikciju potencijalnih lokacija nezgoda koje mogu nastati upravo kao posledica promene strukture, koja se dešava ispod nivoa kolovoza, odnosno putne površi.

Treća grupa predstavlja sisteme sa izvorom koherentne svetlosti, projektovane sa ciljem utvrđivanja stanja putne površi, na osnovu interakcije laserskog zračenja sa površinskim materijalima [13]. Ovakvi sistemi mogu biti upotrebljeni i za potrebe utvrđivanja prisustva drugih materijala na kolovozu, tj. da li je on suv, vlažan, prekriven slojevima vode, snega ili leda [14]. Određuje se debljina snežnog pokrivača, prisustvo i debljina leda i crnog leda, kao i drugih fluida i materija koje utiču na stepen prijajanja pneumatika na podlogu. Moguće je detektovati kristale leda i oceniti temperature trojne tačke, te predvideti trenutak kada će voda iz agregatnog stanja pare preći u tečnost i/ili led i obratno, što je od velikog značaja za bezbednost pri atmosferski otežanim uslovima vožnje na niskim temperaturama.

Cilj ove disertacije je razvoj algoritama za proces klasifikacije i kategorizacije putne infrastrukture. Konkretno, cilj disertacije je razvoj algoritma za predviđanje rizika, zasnovanog na ekstrakciji teksture slike, pomoću sistema za skeniranje kolovoza implementiranog na vozilima u pokretu, i to kombinacijom video-kamere i senzora temperature putne površi. Mapiranje puta u smislu lokacija povećanog rizika, vrši se na osnovu primenjenog algoritma.

Analiza i ocena parametara koji se odnose na strukturu, sastav i geometriju puteva, kao i promene koje nastaju nakon raznih atmosferskih pojava ili prisustva drugih materijala na površini kolovoza, imaju nekoliko zadataka:

- Klasifikaciju kvaliteta podloge, odnosno kolovoza, kvantifikacijom kroz vrednosti tzv. IRI (*International Roughness Index*) parametara;
- Klasifikaciju kolovoza analizom koeficijenta trenja između pneumatika i kolovozne površi;
- Karakterizaciju geometrije puta, tj. kolovoznih traka, u pogledu nagiba i neravnina puta, koja projektantima i izvođačima radova ukazuje na to kako da planiraju i izvedu promene u građevinskom smislu i tako unaprede geometrijske parametre puta, izravnaju ga, sa ciljem smanjenja rizika od izletanja vozila s kolovoznih traka i drugih mogućih nezgoda;
- Klasifikaciju podloge, u pogledu kvaliteta prijanjanja na kolovoz u različitim atmosferskim uslovima, preko vrednosti temperature kolovoza, vazduha, temperature tačke rose, vlažnosti kolovoza, kao i detekcijom prisustva vode, snega i leda na kolovozu.
- Mapiranje puteva prema riziku od proklizavanja vozila, kao podršku bezbednosti saobraćaja klasičnih i autonomnih vozila.

Analizom video-signala moguće je ostvariti preciznu lokalizaciju i dodatni kvalitet u klasifikaciji teksture puteva, čime se pospešuje proces kategorizacije puteva.

Analiza svih pomenutih parametara vrši se primenom statističkih metoda. Konačnu odluku prilikom kategorizacije puteva do sada je uglavnom donosio operater, subjektivnim pristupom kroz vizuelnu verifikaciju na video-snimku. Automatizacija procesa kategorizacije može unaprediti sistem, u smislu da omogući precizniju i kvalitetniju klasifikaciju i jednostavnije objedinjavanje većeg broja parametara u procesu donošenja odluke, što je naročito važno u pogledu buduće upotrebe autonomnih vozila.

Značaj ove disertacije ogleda se u razvoju naprednog algoritma za predikciju rizičnih zona putne površi, kao i za automatizovanu kategorizaciju kompletne putne infrastrukture, koja će biti znatno veće tačnosti i preciznosti u odnosu na postojeća rešenja zasnovana na subjektivnoj i manualnoj proceni stanja puteva. Ova analiza će omogućiti sistematsko objedinjavanje parametara koji utiču na proces kategorizacije. Razvojem ovog algoritma umanjuje se uloga operatera i njegove subjektivne procene u procesu donošenja odluke. Disertacijom je potvrđeno kako se i u kojoj meri različite linearne i nelinearne metode analize mogu primeniti u rešavanju postavljenog problema kategorizacije putne infrastrukture.

Predmet istraživanja je obuhvatao sledeće pravce:

a) Analizom jednodimenzionalnih signala obezbeđuju se dodatne informacije za potrebe preciznije lokalizacije događaja i tačne klasifikacije;
b) Analizom dvodimenzionalnog video-signala omogućeno je isticanje singulariteta u strukturi snimljenog puta kroz analizu sadržaja video-snimka. Izborom adekvatnog opisa sadržaja frejmova obezbeđena je efikasnija klasifikacija i preciznija detekcija promena između klasifikovanih segmenata;
c) Definisanje odgovarajuće logike za proces odlučivanja sa ciljem automatizacije procesa kategorizacije. Korelacijom signala kao nosilaca informacija o lokalitetima detektovanih događaja dobija se segmentacija analiziranih signala, a primenom definisane logike odlučivanja potom treba odrediti adekvatnu kategoriju;
d) Procenu uspešnosti predloženog algoritma za detekciju singulariteta u svrhu klasifikacije putne infrastrukture u zavisnosti od raznih parametara kvaliteta.

1.1 Polazne hipoteze

Hipoteze koje su testirane u disertaciji su sledeće:

- Jednodimenzionalni i dvodimenzionalni signali dobijeni sistemom za snimanje puteva i akviziciju podataka, predstavljaju slučajne/pseudoslučajne vremenske serije koje se mogu analizirati primenom obrade signala.
- Analizom signala može se obezbediti segmentacija koja će omogućiti neophodne informacije potrebne za ocenu i klasifikaciju putne infrastrukture.
- Kombinovanjem informacija dobijenih merenjem putne infrastrukture primenom odgovarajuće logike, moguće je realizovati automatizovanu proceduru za povećanje bezbednosti svih učesnika u saobraćaju, kao i podršku autonomnim vozilima i tzv. pametnim gradovima, zasnovanim na koncepciji *IoT (Internet of Things*) ili *IoV (Internet of Vehicles*), kao i finalnu kategorizaciju putne infrastrukture.
- Kategorizacija i posledično klasifikacija putne infrastrukture može voditi mapiranju puta, u smislu detektovanja rizičnih segmenata puta, koje se tiču opasnosti od proklizavanja vozila.

1.2 Metode istraživanja

Za potrebe istraživanja, a sa ciljem provere predloženih hipoteza i ostvarivanja definisanih ciljeva, u disertaciji su realizovane sledeće naučne metode:

- analiza parametara koji opisuju sastav i geometriju kolovozne površi u jednodimenzionalnom i dvodimenzionalnom domenu;
- statistička analiza rezultata detekcije promena sastava i geometrije kolovozne površi i okolnih slojeva iznad i ispod nje;
- akvizicijom i analizom 2D signala urađena je procena stanja putne površi u smislu teksture, naročito u pogledu detekcije lokaliteta na kojima je moguće predvideti rizik od proklizavaja vozila usled poremećaja teksture;
- provera uspešnosti razvijenog algoritma na testiranim vremenskim serijama;
- dvodimenzionalni signali su iskorišćeni za eksperimentalnu proveru lokaliteta detektovanih na bazi akvizicije i obrade jednodimenzionih signala;
- softverska rešenja koja odgovaraju navedenoj problematici realizovana su korišćenjem do sada poznatih softverskih paketa, kao i onih koji su razvijeni tokom ovog istraživanja.

1.3 Naučni doprinosi

Postoje standardne metode za detekciju promena u strukturi materijala, koje imaju nedostatke u smislu prepoznavanja svih promena koje nastaju u sastavu, geometriji i strukturi materijala, kao i u kombinaciji slojeva različitih materijala. Stoga postoji prostor za unapređenje i razvoj dodatnih metoda koje mogu poboljšati efikasnost detekcije degradacije putne površi i omogućiti njeno bolje razumevanje.

Saglasno tome, ostvareni su sledeći naučni doprinosi doktorske disertacije:

1) Izvršen je detaljan uvid u lokalne karakteristike putne površi, sa ciljem detekcije promena strukture i geometrije puta i slojeva iznad i ispod njegove površi, nezavisno od toga da li su podaci opisa puta i materijala u jednodimenzionalnom ili dvodimenzionalnom domenu.
2) Potvrđena je multifraktalna priroda analizirane putne površi. Dokazano je da se kontinualno skeniranje vertikalnog profila putne površi može posmatrati kao vremenska serija, 1D signal, koji iskazuje osobine multifraktalnosti. Pokazano je da se usrednjavanjem vrednosti parametra kvaliteta makroteksture na segmentima puta ne gubi multifraktalna karakteristika 1D vremenske serije.
3) Dokazano je da se primenom 1D i 2D analize signala može izvršiti precizno lociranje promene u kvalitetu putne infrastrukture, te nije potrebno angažovati skupu 3D opremu. Oprema sa 1D i 2D obradom signala je ekonomičnija u pogledu kompleksnosti uređaja, vremena potrebnog za dijagnostiku i skladišnog prostora za podatke koji su relevantni u daljem postupku kategorizacije putne infrastrukture.
4) Predložen je metod za automatsku detekciju promena fine strukture i geometrije kolovoza, pre nego što je degradacija putne površi vidljiva “golim okom”. Iz ovog metoda izvedena je ocena kvaliteta, kategorizacija i klasifikacija putne površi.

5) Razvijen je i testiran novi algoritam predviđanja rizika proklizavanja na putu, čime je omogućeno mapiranje rizičnih zona duž putne infrastrukture. Algoritam je zasnovan na obradi teksture slike, dobijene pomoću sistema za skeniranje puteva iz mobilnog vozila.
6) Data je mogućnost implementacije predloženog algoritma za predviđanje rizika na putu, za sistem autonomne vožnje.
7) Disertacija ima i praktičan, stručni doprinos tj. automatizovana je vizuelna inspekcija i kategorizacija putne infrastrukture na osnovu predikcije rizika sa mapiranjem kritičnih zona na putu.

1.4 Realizacija istraživanja

Istraživanje je realizovano u nekoliko etapa:

- dat je pregled metoda koje se danas koriste za opisivanje promena strukture i geometrije puta i slojeva iznad i ispod njegove površi, u jednodimenzionalnom i dvodimenzionalnom domenu;
- izložen je pregled načina za opis i kvantifikovanje 1D i 2D signala;
- urađena je akvizicija i analiza svih parametara relevantnih za opis promena strukture i geometrije puta;
- predložena je izrada softvera za linearnu i nelinearnu analizu neophodnih parametara iz 1D i 2D prikaza promene strukture i geometrije puta i slojeva iznad i ispod njegove površi;
- procenjeni su lokalni i globalni parametri metodom inverzne multifraktalne analize, te izdvajanje singulariteta koji mogu ukazati na potencijalne kritične tačke putne deonice;
- analizani su rezultati detekcije promena strukture i geometrije puta i slojeva iznad i ispod njegove površi i njihove raspodele u vremenskom i frekvencijskom domenu.

1.5 Pregled sadržaja doktorske disertacije

U prvom poglavlju doktorske disertacije su nakon opšteg uvoda navedene pretpostavke tj. polazne hipoteze, metode istraživanja i cilj istraživanja. U drugom poglavlju je navedena postavka problema. Konkretno, radi se o problemu preciznog mapiranja puta, baziranog na predikciji budućih oštećenja, koja vode proklizavanju vozila, sa ciljem smanjenja saobraćajnih nezgoda, uz poseban osvrt na problem autonomne vožnje.

Autonomna vožnja predmet je interesovanja ovog istraživanja. Iako je njena koncepcija već postavljena, nemogućnost da se autonomna vozila prilagode postojećoj putnoj infrastukturi, sa naglaskom na promene geometrije i strukture puta, predstavlja akutni problem. U trećem poglavlju je opisan pregled postojeće literature. U četvrtom poglavlju analizirana je i potvrđena multifraktalna priroda teksture putne površi, obradom 1D signala dobijenog laserskim profilometrom. U petom delu je opisan novi algoritam, baziran na obradi i analizi 2D signala.

Ovaj algoritam predviđanja rizika proklizavanja na putu zasnovan je na ekstrakciji teksture slike, dobijene sistemom za skeniranje putne površi iz vozila u pokretu, i može se koristiti za mapiranje rizičnih zona duž putne infrastrukture, kao i za podršku za autonomnu vožnju.

Algoritam je baziran i validiran publikacijom, u časopisu kategorije M23:

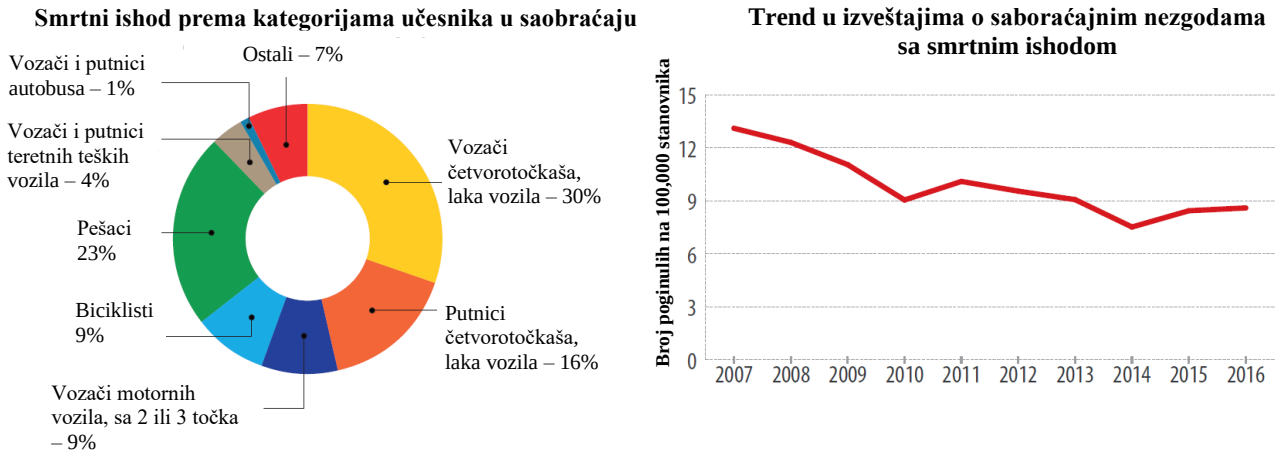
Nikola Slavkovic and Milan Bjelica:"Risk prediction algorithm based on image texture extraction using mobile vehicle road scanning system as support for autonomous driving", Journal of Electronic Imaging 28(3), 033034 (25 June 2019). https://doi.org/10.1117/1.JEI.28.3.033034.

U šestom poglavlju predstavljena su zaključna razmatranja koja opisuju značaj predloženog rešenja. Na kraju je navedena literatura koja je korišćena prilikom izrade ove disertacije.

2. Problem predikcije rizičnih zona puta

U današnjoj postavci ocene kvaliteta, kategorizacije i, naposletku, mapiranja puteva, koriste se statistički podaci o saobraćajnim nezgodama.

Na slici 2.1. je prikazana statistika saobraćajnih nezgoda u Srbiji sa smrtnim ishodima, kao i destogodišnji trend tih nezgoda, prema podacima Ministarstva unutrašnjih poslova. Na osnovu ovakvih podataka se izrađuju aktuelne strategije sigurnosti na putevima [6-8].



Slika 2.1. Statistički prikaz saobraćajnih nezgoda u Srbiji: a) kategorija učesnika u saobraćaju u nezgodama sa smrtnim ishodom; b) desetogodišnji trend, 2006 - 2016. godine, smrtnih ishoda u saobraćaju [6].

Putevi su klasifikovani na različite načine, prema ocenama parametara koji bliže opisuju njihovu geometriju i strukturu. Fotografije ili video-snimci saobraćajnih deonica dobijeni skeniranjem putne površi ili šire kolovozne regije, uglavnom se analiziraju zbog vidljivih i već nastalih degradacija u strukturi puta.

Ovi snimci već pripadaju prošlom vremenu i samim tim je nemoguće dobiti predikciju ili preduzeti mere da ne dođe do nesreće. Fotografije koje nastaju skeniranjem puteva su fotografije prošlosti. Na putu postoji oštećenje, putari su to oštećenje snimili i uneli u bazu. Već je napomenuto [7, 8] da se današnje analize stanja puteva vrše vizuelnom inspekcijom, od strane obučenih operatera, koji na osnovu svog ličnog utiska vrše procenu prema kojoj se radi finalna kategorizacija putne infrastrukture.

Oni posmatraju video-sekvence i uočavaju promene, kao što su: uzdužne i poprečne pukotine, aligator-pukotine, zakrpe na putu, rupe-čepove ili udarne rupe, deformacije u kolotragu i druge vrste deformiteta i anomalija u geometriji i strukturi puta (tabela 2.1). Na osnovu posmatranih video-sekvenci oni donose konačnu odluku o generalnom kvalitetu deonica putne mreže.

Veliki nedostatak ovog pristupa je odsustvo objektivnosti, budući da svaki operater ima svoje lične standarde i procene. Takođe je potrebno, prilikom svake analize, angažovati veliki broj operatera, kao i izdvojiti značajan vremenski period za pažljivo pregledanje video-sekvenci.

Dodatni problem se ispoljava u tome što operateri ne mogu običnim posmatranjem ("golim okom") uočiti manje i fine promene teksture putne površi.

Baza dobijena na ovaj način je baza prošlih događaja. Ona je slabo upotrebljiva, tim pre što će se svako vidljivo oštećenje puta neminovno popraviti, te ne može biti deo predikcije nastajanja degradacije u ranoj fazi, niti preciznog mapiranja rizičnih, potencijalno opasnih tačaka na putnoj deonici.

Tabela 2.1. Vidljiva oštećenja i degradacije putne površi, snimljene na putnim pravcima koji su bili predmet analize u disertaciji (primeri 1-3)

	Uzdužna pukotina na putu, delimično sanirana, na deonici Ćelije – Županjac.
	Složena uzdužna pukotina na putu, u levom kolotragu, deonica Stepojevac (Veliki Crljeni) – Lazarevac (Ibarski put).
	Poprečna pukotina s dodatnim kosim oštećenjima, deonica Ćelije – Županjac.

Tabela 2.1. Vidljiva oštećenja i degradacije putne površi, snimljene na putnim pravcima koji su bili predmet analize u disertaciji (primeri 4-6)

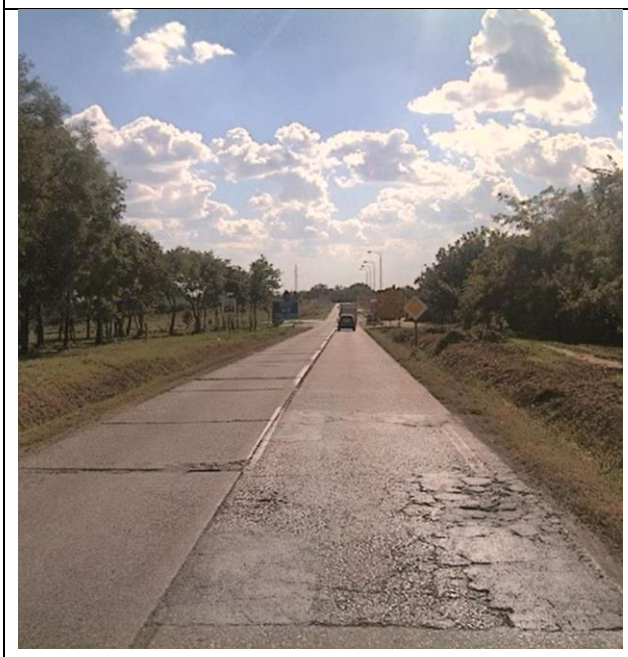
	Aligator pukotine na manjoj površini. Pukotine se razvijaju u svim pravcima i podsećaju na reljef krokodilske kože, deonica Kadina Luka - Dići.
	Aligator pukotina s kumulativnim i ponovljenim oštećenjima nakon sanacije, deonica Ćelije – Županjac.
	Uzdužne pukotine u oba kolotraga, deonica Stepojevac (Veliki Crljeni) – Lazarevac (Ibarski put).

Tabela 2.1. Vidljiva oštećenja i degradacije putne površi, snimljene na putnim pravcima koji su bili predmet analize u disertaciji (primeri 7-9)

	Zakrpe na površi u desnoj saobraćajnoj traci, deonica Petrovaradin (Račkog) – Maradik (Beška).
	Višestruke zakrpe na kratkoj deonici kolovoza, deonica Biljanovac – Brvenik.
	Višestruke zakrpe na kratkoj deonici kolovoza, deonica Novi Pazar (Brđani) – Ribarice.

Tabela 2.1. Vidljiva oštećenja i degradacije putne površi, snimljene na putnim pravcima koji su bili predmet analize u disertaciji (primeri 10-12)

	Zakrpe na kolovozu, sa nastankom novog oštećenja, deonica Gornji Milanovac - Preljina.
	Rupa, nastala kao posledica ispalog čepa iz gornjeg površinskog sloja asfalta, deonica Gornji Milanovac - Preljina. Ovakve degradacije nastaju kao posledica pojave leda koji se nađe u prethodnim pukotinama, i širenjem izbaci čep asfalta van putne površi.
	Čep-rupa u levom kolotragu, deonica Stepojevac (Veliki Crljeni) – Lazarevac (Ibarski put).

Tabela 2.1. Vidljiva oštećenja i degradacije putne površi, snimljene na putnim pravcima koji su bili predmet analize u disertaciji (primeri 13-15)

	Sanirane aligator pukotine, deonica Lazarevac (Ibarski put) - Ćelije.
	Sanirane aligator pukotine, deonica Stepojevac (Veliki Crljeni) – Lazarevac (Ibarski put).
	Sanirane aligator pukotine, nakon čega su nastala nova oštećanja na putu, deonica Lazarevac (Ibarski put) - Ćelije.

Tabela 2.1. Vidljiva oštećenja i degradacije putne površi, snimljene na putnim pravcima koji su bili predmet analize u disertaciji (primeri 16-18)

	Put s vidljivim oštećenjima svih navedenih tipova, deonica Raška (Kuti) – Novi Pazar (Banja).
	Put s vidljivim oštećenjima svih navedenih tipova, deonica Raška (Kuti) – Novi Pazar (Banja).
	Put s vidljivim oštećenjima svih navedenih tipova, deonica Raška (Kuti) – Novi Pazar (Banja).

Slika 2.2. Prikaz dobrog stanja putne površi, deonica Dići – Ugrinovci.

Ono što je potrebno jeste da se kreira slika budućnosti, da se uradi detekcija promena fine teksture puta na kome se "golim okom" ne bi ni primetila promena teksture površine, kao na slici 2.2. Potom te podatke treba uneti u bazu podataka i napraviti predikciju i mapu rizičnih segmenata puta, tj. predvideti buduće opasnosti za učesnike u saobraćaju [5]. Samo tako se mogu smanjiti saobraćajne nezgode i smrtnost na putevima. Stoga je, u pogledu sigurnosti, potrebno kreirati sistem za analizu fine teksture puta, koji će detektovati problem na njegovoj površini, pre nego što se uopšte može uočiti pregledom od strane stručnih lica.

U tom smeru je razvijen algoritam predviđanja rizika čija je primena ključna u vozilima kojima upravljaju vozači, jer su istraživanja pokazala da ljudi ne obraćaju dovoljno pažnje na takozvane signale koji će im ukazati na opasnost. U većini slučajeva ljudi poštuju samo znake i mape, koji ukazuju na više ili manje rizičan put. Tim pre, mapiranje puta predstavlja jedan od velikih izazova današnjih strategija za bezbednost saobraćaja.

Saobraćajne nezgode jedan su od najvećih problema savremenog društva uopšte. One se danas nalaze na osmom mestu glavnih uzročnika smrtnih ishoda, na globalnom nivou, posmatrano za sve starosne dobi [1]. Štaviše, ako se posmatra starosna granica od 5 do 29 godina, saobraćajne nezgode su na prvom mestu uzročnika smrti.

U Evropskoj uniji, više od 30.000 ljudi je smrtno stradalo, a oko 1,5 miliona osoba je lakše ili teže povređeno u više od 1,1 milion poslednjih zabeleženih saobraćajnih nezgoda [1]. U regiji jugoistočne Evrope, broj smrtnih slučajeva na putu je prosečno 11.000 ljudi godišnje. Sa slike 2.3. može se uočiti da stopa smrtnosti na putevima, u odnosu na 100.000 stanovnika, u našem okruženju, varira od 7 u Sloveniji, oko 8 u Srbiji i Hrvatskoj, preko 10 u Crnoj Gori, do skoro 16, koliko iznosi u Bosni i Hercegovini.

Teret povreda i smrtnih slučajeva saobraćajnih nezgoda nesrazmerno opterećuje najranjivije učesnike u saobraćaju, decu i mlade, i to se najviše odnosi na stanovništvo zemalja u tranziciji s niskim i srednjim bruto nacionalnim dohotkom, a u kojima je veći broj smrtnih slučajeva podstaknut pojačanim motorizovanim saobraćajem.

Činjenica koja uz navedene podatke najviše poražava, jeste ta da je skoro svaki od smrtnih ishoda i povreda mogao da bude sprečen.

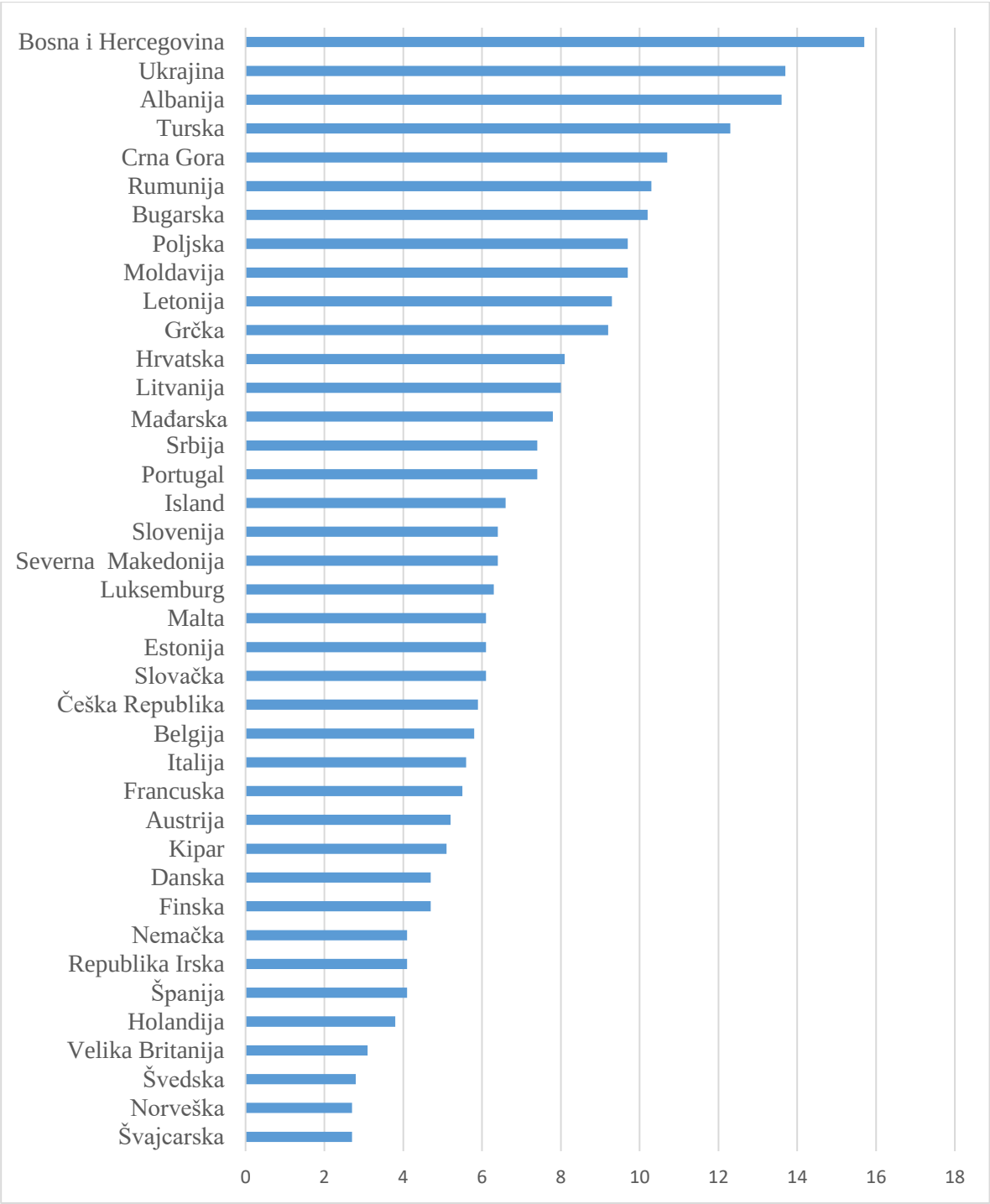
Smanjenje broja stradalih i povređenih učesnika u saobraćaju jedan je od najvećih izazova za profesije koje se bave saobraćajnim rizicima, sigurnošću na drumovima i uopšte transportom svih učesnika u saobraćaju. Analitičari i eksperti koji se bave proučavanjem saobraćajnih nezgoda, ukazuju na to da je svaki događaj u saobraćaju veoma složen proces i da uključuje različite kinematičke i dinamičke faktore koji određuju stepen nezgode, njene uzroke i posledice. Ovi faktori mogu biti kategorizovani u odnosu na vozača i njegovo psihofizičko stanje, zatim, u odnosu na tehničke karateristike i ispravnost vozila i, naposletku, u odnosu na stanje i geometriju kompletne putne infrastrukture ili njene deonice. U ovakvim procesima složenost diktira uvođenje više podpromenljivih. Usled te složenosti i poteškoća u identifikaciji elemenata ljudskog faktora, većinu saobraćajnih udesa čine greške vozača. Ovi faktori tipično uključuju umor vozača, probleme usled intoksikacije alkoholom, opojnim i sličnim sredstvima, neiskustvo mlađih učesnika u saobraćaju i druge moguće spoljnje ometajuće faktore, koji su uticali na ponašanje vozača. Procene bezbednosti podrazumevaju i sveobuhvatnu analizu preovlađujućih faktora u trenutku nesreće, uključujući i one koje se odnose na površinu kolovoza, kako bi se utvrdile neophodne mere (tj. poboljšanja sigurnosti) i sprečilo ponavljanje sličnih saobraćajnih scenarija (aktivna bezbednost) [6-8].

Implementacija sistema koji utiču na povećanje sigurnosti na putevima kako bi se smanjio broj nesreća i smrtnih slučajeva je bila izuzetno efikasna tokom godina [6]. Ipak, potpuno eliminisanje saobraćajnih nezgoda nije moguće, ali je zato smanjenje njihovog broja i ublažavanje posledica veoma važan cilj. U tom smislu, osim analize ljudskog faktora na različitim nivoima, potrebno je posvetiti više pažnje i svim drugim elementima mreže puteva koji mogu biti činioci koji doprinose saobraćajnim nezgodama. Jedan takav činilac koji se veoma podrobno analizira i kojem se poslednjih godina posvećuje velika pažnja jeste površina puta, sa naglaskom na njenu kompozitnu strukturu, geometriju u raznim skalama i otpornost na proklizavanje vozila u različitim vremenskim uslovima. Obezbeđivanje dovoljno visokog koeficijenta trenja za sve vremenske uslove i tipove kolovoza, imajući u vidu širok spektar metodologija izgradnje i materijala za puteve, od velikog je značaja i trebalo bi ga na odgovarajući način razmotriti u nastojanju da se smanji broj i težina posledica saobraćajnih nezgoda.

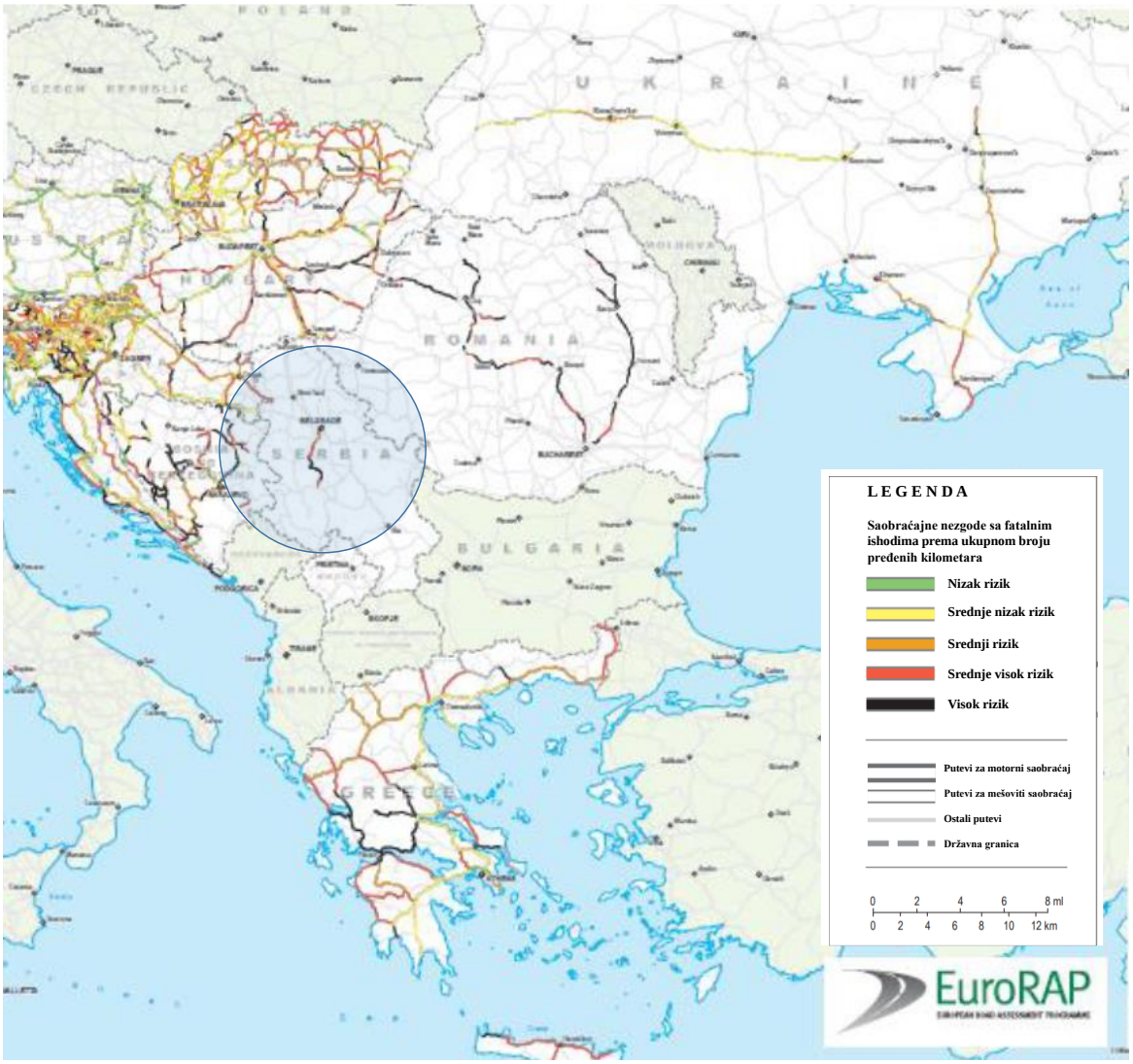
U izradi izveštaja SZO korišćeni su primarni izvori podataka, a to su: podaci iz javno dostupnih baza, uključujući i bazu podataka UN o ekonomskoj konvenciji o putnom saobraćaju, vladine *web* stranice, kao i specijalizovani entiteti kao što su Globalni program za procenu novih automobila (iRAP) i podaci o inspekciji puta prikupljeni od strane Međunarodnog programa za ocenjivanje puteva i evropskog Programa za procenu puta (EuroRAP) za merenje nivoa bezbednosti za različite učesnike u saobraćaju [1, 7, 8].

Svetska zdravstvena organizacija - SZO i program EU za dijagnostiku puteva- EuroRAP zajednički su uradili mapiranje puteva jugoistočne Evrope, što je prikazano na slici 2.4. [7]. Korišćeni su statistički podaci o smrtnim slučajevima i teškim povredama, spojenim sa brojanjem prolazaka saobraćajnih vozila, odnosno, frekvencijom protoka vozila u konkretnim tačkama puta. Putevi su, prema takvom pristupu, klasifikovani na puteve sa: niskim, srednje niskim, srednjim, srednje- visokim i visokim nivoom rizika saobraćaja.

Na slici 2.4. se može uočiti da je Srbija oskudno mapirana, kad su u pitanju rizici. Takođe, mapiranje je učinjeno isključivo na osnovu statistički obrađenih događaja. Ovakvo mapiranje zapravo predstavlja blago upozorenje vozaču da dolazi u tačku gde se ranije desila saobraćajna nezgoda, s tim da je u međuvremenu taj put, upravo iz tog razloga, mogao biti popravljen ili na bilo koji način izmenjen.



Slika 2.3. Godišnja stopa smrtnosti na putevima Evrope (broj poginulih na 100.000 stanovnika) [1].



Slika 2.4. Mapiranje puteva jugoistočne Evrope, prema stepenu rizika [7].

Veština i ponašanje vozača, geometrija kolovoza, kontrola saobraćaja, stanje površinskog sloja kolovoza, tip vozila i uslovi i opterećenja pneumatika, brzina vozila i ispravnost kočnica, predstavljaju primarne faktore koji doprinose povećanju rizika od nezgoda duž putne infrastrukture. Međutim, neki od ovih faktora su više, a neki manje istraženi. Nekontrolisano klizanje usled neadekvatnog površinskog trenja i loša vidljivost izazvana vremenskim prilikama, dva su glavna uzroka zbog kojih se, pri vlažnim vremenskim uslovima, proklizavanjem, događa od 15% do 35% od svih nastalih nezgoda [8].

Stanje putne infrastrukture je čest uzročnik saobraćajnih nezgoda na putevima [15], ali ne postoji dovoljno istraživanja, kako bi se sa sigurnošću mogao mapirati put prema rizičnosti, tokom vlažnog vremena, bilo da vlažnost potiče od padavina ili kondenzacije.

2.1 Kvalitet profila putne površi i problem otpornosti na proklizavanje

Otpornost na proklizavanje predstavlja važan faktor u određivanju nivoa bezbednosti na putu. Ona se definiše kao sila trenja koja se razvija u kontaktu pneumatika s kolovozom [16, 17]. Drugim rečima, otpornost na proklizavanje se ispoljava silom koja se opire klizanju po površi kolovoza. Ova sila je suštinska komponenta bezbednosti na putevima [17], jer obezbeđuje neophodno prijanjanje pneumatika vozila, za punu kontrolu nad vozilom i bezbedno zaustavljanje u vanrednim situacijama.

Elementi koji utiču na otpornost na proklizavanje su [18]:

1. Atmosferske prilike

Otpornost na proklizavanje se smatra problemom vlažnog kolovoza, budući da suv kolovoz obezbeđuje veću otpornost na klizanje i ne predstavlja problem iz aspekta proklizavanja. Iz tog razloga, procedure i studije bezbednosti koje su vezane za proklizavanje uglavnom su fokusirane na vlažan put [18].

Vozila koja se kreću malim brzinama na vlažnim putevima, nailaženjem točka na regiju putne površi, istiskuju vodu sa kolotraga, i na taj način drže pneumatik u punom kontaktu sa odgovarajućom površinom na kolovozu. Otpornost na proklizavanje se smanjuje s povećanjem brzine vozila.

U ovom slučaju je smanjeno trenje, zato što se između pneumatika vozila i površine puta formira vodeni film, čime se potencijalno izaziva gubitak prijanjanja vozila na tlo, uz efekat lebdenja na vodenom sloju - “hidroplaning” (*hydroplaning*) [19].

2. Debljina vodenog filma

U aktuelnim koncepcijama bezbednosti na putu sprovode se konstantni istraživački napori u razvoju i izradi smernica za implementaciju metoda koje će omogućiti efikasnu drenažu vodenih nanosa sa površine puta. Drenaža igra važnu ulogu u ublažavanju “hidroplaninga”, koji direktno zavisi od debljine vodenog filma na kolovozu [19].

3. Ostali elementi

Pored uticaja atmosferskih prilika, navodi se da potencijal za saobraćajne nesreće od proklizavanja potiče i od brzine vozila, radijusa krivine, intenziteta sile ubrzanja ili kočenja, stanja pneumatika vozila, kao i karakteristika same površine puta [18]. Generalno, dobra dubina teksture puta pomaže u obezbeđivanju višeg stepena trenja, međutim, treba imati na umu da se trenje svakako smanjuje sa povećanjem brzine vozila.

Postoje i dodatni elementi koji utiču na koeficijent trenja, povezani sa otpornošću na proklizavanje, a to su: pritisak vazduha u gumi, njena temperatura, vrsta i dubina šare [20].

Ovi faktori doprinose nivou prijanjanja autogume na površinu puta. Zatim, treba dodati i sasvim sporedne, ali ne manje bitne faktore za bezbednost saobraćaja i određivanje otpornosti na proklizavanje, a to su: hemijski sastav i stanje površi puta, u smislu prisustva vlage, blata, snega, leda, ulja ili drugih agenasa koji utiču na promene interakcije pneumatik – putna površ.

Faktor koji se ne može svrstati u infrastrukturni skup činilaca bezbednosti vožnje svakako je i reakcija tj. ponašanje vozača.

Diskutabilne su teorije da li svi vozači menjanju svoje ponašanje u skladu sa putnim okruženjem, vremenskim prilikama ili godišnjim dobom. Ovo je već u domenu istraživanja bihejviorizma.

Konkretne analize pokazuju da je izbor vozača da smanji brzinu u zimskim uslovima obično daleko ispod potrebnog nivoa i nedovoljan da se izvedu manevri koji zahtevaju neočekivana i iznenadna kočenja i zaustavljanja.

Urađena su dva eksperimenta, od strane Švedskog nacionalnog instituta za istraživanje puteva i transporta [21], pri različitim vrednostima koeficijenta trenja duž puta, u letnjem i zimskom scenariju [16, 17]. Rezultati su pokazali da su razlike u brzini vožnje istih vozača, tokom leta i zime, u prvom eksperimetnu bile 11-12 km/h, a u drugom 16-17 km/h.

Takođe, urađene su analize izbora brzine vožnje, pri različitim uslovima na površini puta i njihov efekat na dužinu zaustavnog puta. Za suve uslove i puteve s ograničenjem brzine od 90 km/h, vozila su se u letnjim uslovima kretala od 85 do 95 km/h.

U zimskim uslovima vožnje brzine su, usled pojave leda i tvrdog snega na površini puta, smanjene za samo 6-10 km/h. Studija je pokazala da bi, uz pretpostavku da je vreme reakcije vozača reda jedne sekunde, a koeficijenti trenja variraju od 0,8 (suvo vreme) do 0,25 (led/sneg), potencijalni zaustavni put varirao od 65 do 129 metara. Ovo potvrđuje da je odluka vozača za prilagođenje brzine u zimskim uslovima bila daleko ispod potrebnog nivoa. Da su vozači zaista imali sposobnost da razumeju uslove trenja na površini, bilo je potrebno da smanje brzinu na oko 56 km/h, što je za 30 km/h manje od brzine vožnje u letnjim uslovima.

Zaključak je da su, nažalost, vrednosti stvarnog koeficijenta trenja, odnosno prijanjanja vozila na površ puta, bile slabo povezane sa vozačevim izborom brzine [21]. Umesto toga, vizuelne informacije su se pokazale mnogo relevantnijim uz određena saznanja, npr. da li pada sneg ili kiša, ili je u pitanju neko drugo spoljašnje upozorenje na opasnost.

Analiza urađena u ovoj doktorskoj disertaciji nadovezuje se na pomenuti eksperiment. Potrebno je mapirati put i obeležiti zone visokog rizika na njemu, jer će vozači jedino tako ozbiljno shvatiti opasne tačke i povećati bezbednost u saobraćaju.

2.2 Autonomna vožnja, sigurnost i perspektive

U svetu okrenutom budućnosti, nameće se neizostavno pitanje, a to je na koji način dostići visok nivo bezbedne vožnje u vremenu koje dolazi. Tim pre što je budućnost saobraćaja svakako okrenuta vožnji korisnika autonomnih vozila. Urađene su brojne analize na temu bezbednosti autonomnih vozila. Odgovor još uvek nije dat.

Do sada se najveći broj testova odnosio na ispitivanje ponašanja autonomnih vozila u realnom saobraćaju, posmatranje i statističko poređenje sa karakteristikama ljudskog vozača.

Urađene su analize koje izračunavaju broj kilometara vožnje koji bi bio potreban da bi se dobili jasni dokazi o bezbednosti autonomnog vozila [22]. Rezultat toga je procena da bi potpuno autonomna vozila morala biti vožena stotine miliona, a ponekad i stotine milijardi kilometara, kako bi se pokazala njihova pouzdanost u pogledu smrtnih slučajeva i povreda.

Pošto ovo nije realno izvodljivo, potrebno je razvijati inovativne metode predikcije za dokazivanje bezbednosti i pouzdanosti [22].

Budući da autonomna vozila već postoje i testiraju se širom sveta, već su definisana neka bitna pitanja koja su ključna za njihovo sigurno funkcionisanje.

Iznenađujuća je pretpostavka da neminovno mora proći još nekoliko decenija, pre nego što autonomna vozila postanu deo uobičajenog stila života [22].

Detektovani postojeći problemi autonomne vožnje su [23]:

1. *Vremenske prilike, sa naglaskom na pojavu kiše i snega*

Kada snežni pokrivač prekrije kolovoz, on ograničava vidno polje kamere, ili celog sistema koji se, uglavnom, nalazi na krovu vozila (slika 2.5). S obzirom da je udaljenost kamere od površi puta oko pet i više metara, pojave snega, kiše i leda značajno smanjuju mogućnost uočavanja oznaka i linija na putu. Istraživači još uvek nisu našli način da se ovo pitanje reši. Iz ovog razloga su sva dosadašnja testiranja sprovedena po suvom i letnjem vremenu, npr. u Arizoni ili Kaliforniji. Jak sneg, kiša, magla, oluje, remete vidno polje, rezoluciju, pa čak i osvetljenost koja je potrebna za nesmetano funkcionisanje kamere.

Slika 2.5. Foto senzor i niz kamera na jednom od test vozila kompanije Argo Al, Fordove jedinice autonomnih vozila, u Pitsburgu [23].

Svetlosni snop koji se emituje iz senzora sa koherentnim izvorima, može se odbiti od pahulja snega i/ili reagovati na pahulju kao da je prepreka.

Ovo su aktuelni problemi i kod današnjih lidarskih (LIDAR - Light Radar, LADAR - Laser Radar) sistema [24]. Sa druge strane, signalni impuls u elektromagnetnom opsegu klasičnog radarskog sistema može da prodre kroz pahulje snega ili druge prepreke u vezi sa atmosferskim pojavama, ali on ne detektuje tačan oblik objekta, što je potrebno kako bi veštačka neuralna mreža zaključila o kakvom se scenariju radi. Sistem veštačke inteligencije još uvek nije u mogućnosti da razluči pravu prepreku od kiše, snega ili magle. Najveći problem vezan za atmosferske uticaje jeste taj da optički senzori ne mogu da dobiju informacije kroz veći sneg, kišu ili maglu, odnosno ne mogu da detektuju pravac kretanja vozila, ako su linije na putu pokrivene [25].

Ovom već detektovanom problemu autonomne vožnje, treba dodati problem koji je prisutan i u ljudskoj vožnji, a to je proklizavanje vozila. Do sada nije pronađen način da autonomno vozilo odreaguje tako što će prilagoditi stil vožnje eventualnoj opasnosti od proklizavanja.

Atmosferske prilike, debljina vodenog filma i drugi navedeni faktori koji utiču na otpornost na proklizavanje vozila pod kontrolom vozača, još su izraženiji kada govorimo o sigurnosti autonomnih vozila. Naročito je važno za autonomnu vožnju, pri navedenim problemima, mapirati put i obeležiti zone visokog rizika.

U sadašnjoj fazi razvoja autonomnih vozila, mapiranje rizičnih deonica biće pokazatelj optimalne putanje kojom takva vozila treba da se kreću.

2. *Linije na putu*

Posmatranjem putne mreže širom sveta, može se zaključiti da se linije na kolovozu veoma različito obeležavaju. Na nekim putevima one čak i ne postoje [22]. Format linija i oznaka na putevima nije ni standardizovan, što znači da bi autonomno vozilo moralo da nauči kako da se kreće u različitim gradovima. U slučaju drugog primera, u Pitsburgu, gde je testiran veći broj autonomnih vozila [22, 23], linije su iscrtane i u uskim ulicama, kako bi se označile granice kretanja vozila. Ali, ponekad su neke linije toliko udaljene od raskrsnice, a zgrade toliko blizu ulice, da autonomno vozilo ne može da "vidi" saobraćaj na raskrsnici. U tim tačkama, vozilo kojim upravlja čovek, zaustaviće se bliže raskrsnici, iako je to iza iscrtane linije, kako bi vozač bolje video saobraćaj u okruženju, čime će njegova, i bezbednost ostalih učesnika u blizini, biti zadovoljena. Predlaže se alternativno rešenje u ovom slučaju, a to je "napredovanje" autonomnih vozila do tačke vidljivosti, no ovo još uvek nije razvijeno, s obzirom na veoma velike razlike u konfiguraciji raskrsnica [23].

3. *Susret sa ljudskim vozačima*

U dužem narednom vremenskom periodu autonomna vozila će morati da se susreću sa vozilima kojima upravlja čovek koji se, sa svoje strane, ne pridržava striktnih pravila vožnje. U Pitsburgu se 2019. godine dogodio slučaj da se autonomno vozilo zaustavilo tokom skretanja udesno, blokirajući raskrsnicu. Ovo se desilo usled nemogućnosti donošenja odluke za zaobilaženje dva paralelno zaustavljena kamiona, koji su bili nepropisno parkirani [26].

Posebno pitanje su maliciozni pristupi, sa željom da se dokaže da je ljudska inteligencija ispred veštačke. Autopilot na Tesla-vozilima koristi 13 ultrazvučnih senzora koji pomažu da se vozilo samo zaustavi, promeni trake ili izbegne prepreke [24]. Međutim, to i dalje nije dovoljno za sigurnu vožnju.

Na slici 2.6, demonstrirano je kako kredom nacrtana puna linija oko Tesla autonomnog vozila, zbunjuje i potpuno zaustavlja vozilo, tako da ono neće krenuti dalje, bez reprogramiranja softvera [24].

Slika 2.6. Tesla autonomno vozilo, blokirano za dalju vožnju jednostavnim trikom [24].

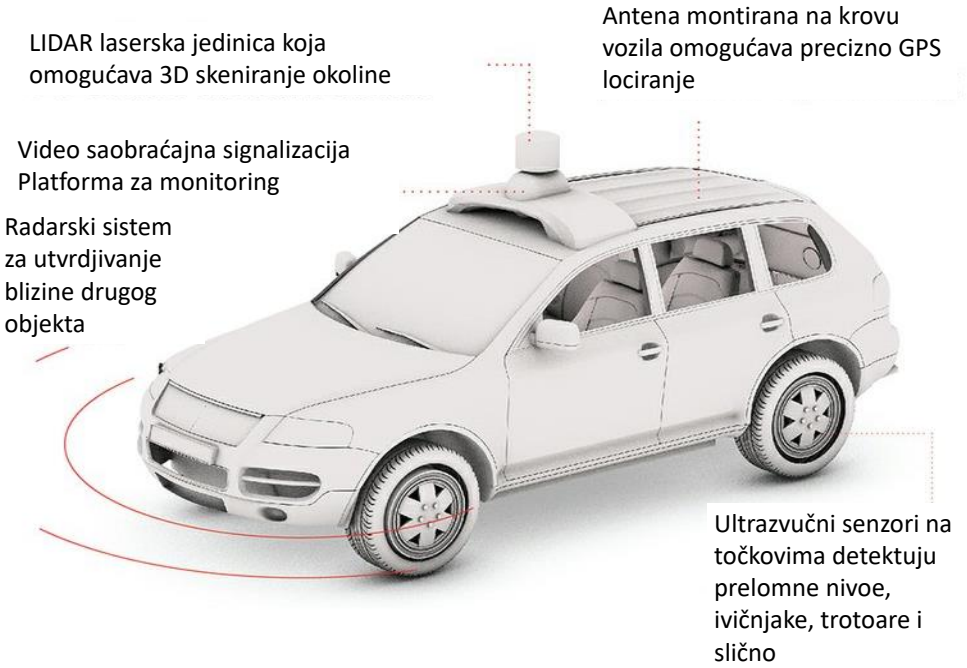
4. *Skretanje ulevo*

Odluka o tome u kom tačno trenutku skrenuti levo ispred dolaznog saobraćaja iz suprotnog smera, jedan je od najvećih problema sa kojima se susreću vozači. Istovremeno, ovo predstavlja uzročnik velikog broja sudara vozila, pri promeni pravca kretanja [3]. Veštačka inteligencija u autonomnim vozilima suočava se sa istim problemom. Realna testiranja pokazuju da su ova vozila često ostajala blokirana zbog nemogućnosti donošenja odluke na raskrsnicama bez svetlosne signalizacije, naročito pri skretanju ulevo.

Autonomna vozila, generalno, zavise od niza senzora koji šalju podatke računaru koji ih procesuira u realnom vremenu. Na slici 2.7. pokazano je kretanje autonomnog vozila u urbanoj sredini [23]. Detaljan prikaz opreme koja se koristi za ova vozila dat je na slici 2.8 [27].

Dakle, što se tiče bezbednosti vožnje autonomnog vozila, postoji više problema, tj. niz kritičnih pitanja. Jedan aspekt je obuhvaćen u ranije navedenim problemima i odnosi se na perfektnost kreirane veštačke neuralne mreže koja imitira ljudskog vozača. Drugi, najmanje istraživan, jeste transformacija u sastavu i geometriji puteva po kojima autonomno vozilo treba da se kreće. Koliko god savršeno bila projektovana veštačka inteligencija koja upravlja vozilom, sa mogućnostima predikcije iznenadnih događaja, ostaje ključno pitanje, a to je kuda će se voziti ovakva vozila? Na kom putu se može kretati autonomno vozilo? Koju vrstu degradacija u strukturi puta može detektovati, i kako će se, u tom slučaju, ponašati autonomno vozilo?

Slika 2.7. Test vozilo iz Argo Al, Fordove jedinice za autonomna vozila, u gradskoj vožnji u Pitsburgu, decembar 2018. godine [23].



Slika 2.8. Raspored opreme koja se koristi u vožnji autonomnog vozila [27].

Navode se i pravna pitanja odgovornosti: Još uvek nije utvrđena krivica za prvi smrtni slučaj pešaka, prouzrokovan kretanjem autonomnog vozila u Arizoni, 2018. godine [25].

U mnogim istraživanjima, autori pokušavaju da daju okvir za planiranje kretanja autonomnog vozila na putu, uzimajući u obzir rizike uzrokovane samim stilom vožnje autonomnog vozila, te spoljne rizike koji potiču od drugih učesnika u saobraćaju.

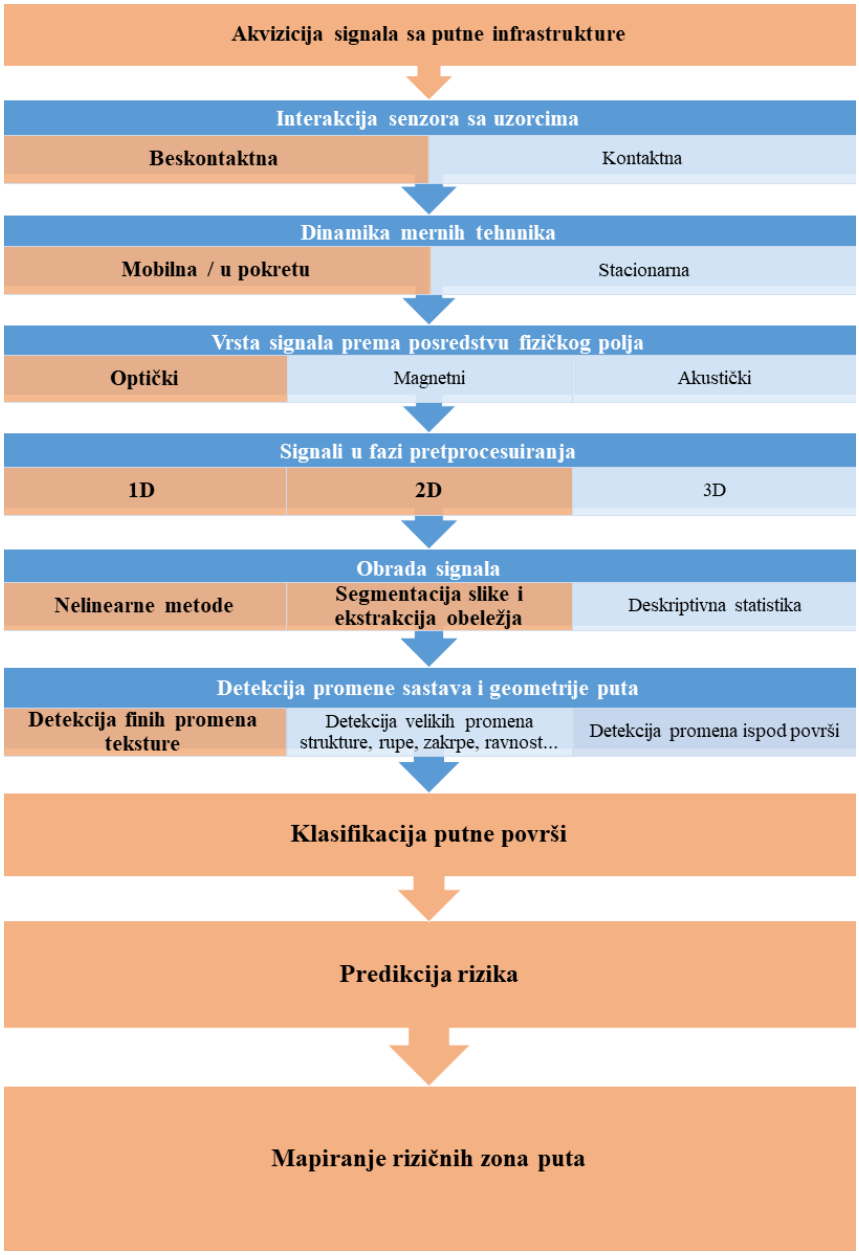
Različiti modeli predviđaju buduće kretanje učesnika u saobraćaju, a takođe izračunavaju i nesigurnost duž predviđene putanje [29]. Sadržaji predloženih projekata kojima se generišu sigurne putanje su krajnje diskutabilni. Naročito zbog toga što je praksa demantovala mnoge naučne radove iz ove oblasti, nakon niza saobraćajnih nesreća [28]. U današnje vreme, sve se više okrećemo činjenici da nije dovoljno pobrinuti se za kreiranje optimalne veštačke neuralne mreže. Napredak samog autonomnog stila vožnje nije dovoljan. Čak ni činjenica da se u novije vreme stil vožnje prilagođava raspoloženju korisnika nije dovoljna da se kaže da autonomna vožnja sasvim funkcioniše. Sve savršenija 3D precizna detekcija objekata u scenariju autonomnog kretanja [30] takođe nije dovoljna za potpunu sigurnost i bezbednost u vožnji.

Dakle, najsavršenija veštačka neuralna mreža, sa stilom vožnje prilagođenim raspoloženju korisnika, sa relativno preciznom 3D detekcijom objekata u okruženju i preciznim mapama, i dalje nije dovoljna da kažemo da je autonomna vožnja sigurna [30].

Najmanji broj istraživanja u ovoj problematici sproveden je u oblasti putne strukture i njene prilagođenosti autonomnoj vožnji. Autonomno vozilo se mora kretati po putevima različite strukture i geometrije, a oni moraju biti u dobrom stanju.

U ovakvim okolnostima, mapiranje puteva za vožnju autonomnih vozila predstavlja jedan od najvećih izazova za koncepcije bezbednosti saobraćaja u budućnosti.

3. Pregled postojeće literature



Slika 3.1. Diagram analiziranih podataka iz postojeće literature, za potrebe razvijanja algoritma klasifikacije, predikcije rizika i mapiranja putne površi

Koncepcija bezbednosti u saobraćaju zahteva unapređenje postojećih i uvođenje novih metoda za ocenu kvaliteta putne infrastrukture. Postojeće merne tehnike i procedure za dijagnostiku puteva su preporučene aktuelnim tehničkim regulativama i standardizacijom. Ove publikacije detaljno opisuju fizičke principe, merne tehnike i opremu, pa čak i konkretnu terminologiju zastupljenu u svim fazama dijagnostike. [9-11, 31-40]. Na osnovu ovih preporuka se vrše odgovarajuća merenja, a prema obrađenim rezultatima se, na kraju, uspostavlja princip kategorizacije puteva, sa predlogom konkretnih aktivnosti za povećanje bezbednosti učesnika u saobraćaju [7, 8].

Aktuelne merne tehnike i procedure predstavljaju prvu, ali, ključnu fazu u procesu precizne klasifikacije i kategorizacije putne mreže ili jednog njenog dela, a realizuju se na osnovu dva fizička pristupa, prema vrsti interakcije merne opreme sa uzorcima putne strukutre i/ili površi.

- Kontaktni pristup – podrazumeva neposredan fizički kontakt senzora i ispitivanog uzorka putne površi, putem kojeg se vrši karakterizacija geometrijskih i strukturalnih osobina puta, a veoma često i simulacija kretanja i ponašanja vozila duž putne deonice od interesa.
- Beskontaktni pristup, putem kojeg se interakcija između senzora i uzoraka od interesa obavlja u postupku daljinskog skeniranja.

U oba slučaja, u i kontaktnom i beskontaktnom pristupu, dinamika akvizicije podataka se može obaviti na dva načina: stacionarno ili u pokretu.

Kontaktne tehnike su razvijane u najranijem, pionirskom periodu uspostavljanja bezbednosnih strategija za ocenu stanja puta i karakterizaciju njegove strukture i geometrije. Najčešće korišćene kontaktne metode direktnog merenja profila putne površi, odnose se na tzv. volumetrijska testiranja [32, 33], i realizuju se manuelno; takođe, manuelnim putem se proveravaju slojevi i na većim dubinama putne strukture, uzimanjem uzoraka u formi vertikalnih čepova, tzv. kernel [41]; mehanički profilometri predstavljaju kategoriju uređaja za skeniranje, kod kojih je sonda senzora izrađena u obliku igle, sa vrhom od safira ili dijamanta. Vrh igle dodiruje površ u smeru kretanja, i tako karakteriše promenu profila te površi; [42]; veoma često se u merenjima ravnosti puta koriste i akcelerometarski profilometri [31], koji podatke o profilu putne strukture prikupljaju kroz inercijalni sistem, postavljen na vozilo ili na specijalno kontruisane platforme; svojim kretanjem one simuliraju kretanje vozila po putnoj deonici i tako beleže vrednosti parametara od interesa (stepen trenja između putne površi i pneumatika, koficijent prijanjanja pneumatika, koeficijent proklizavanja) [43-49]. Budući da je veoma otežano kontaktno testirati teksturu na površi puta, ovakvi procesi se uglavnom izvode samo na pojedinim lokacijama u fazi izbora agregata koji čini površisnki sloj puta, i u laboratorijskim uslovima [46-48]. Stoga se može reći da se kontaktne merne tehnike najčešće realizuju u režimu stacionarne akvizicije, koja podrazumeva postavljanje merne opreme u jednu ili nekoliko tačaka putne deonice, u *in situ* dijagnostičkoj proceduri. Jedan broj kontaktnih senzorskih platformi se samostalno, ili uz pomoć drugih vozila, može kretati po putnoj površi i obaviti akviziciju na kratkoj deonici puta. Kontaktne metode se obavljaju u laboratorijskim uslovima, kada oprema nije lako prenosiva, ili kada se zahtevaju posebni, kontrolisani uslovi merenja i simulacije degradacije asfaltno-betonskih mešavina (temperatura, vlažnost, pritisak, simulacija habanja opterećenjem i sl.) [50, 51].

Kontaktne merne metode su i danas prisutne u putnoj dijagnostici. Međutim, proces njihovog sprovođenja je dugotrajan, a eksperimentalna postavka komplikovana. Procedure merenja upotrebom specijalnih konstrukcija i senzorskih platformi su složene, zahtevaju mnogo prostora za sprovođenje akvizicije, i ometaju regularan transport putnika i robe. To je jedan od glavnih razloga zbog kojeg, u strategijama bezbednosti saobraćaja, sve veći primat dobijaju beskontaktne dijagnostičke metode. Koncepcija beskontaktnog skeniranja putne strukture kvalifikuje kontaktne metode kao kontrolne merne tehnike, kojima se utvrđuju efikasnost, tačnost i preciznost novonastupajućih beskontaknih senzorskih uređaja.

Beskontaktne metode za analizu strukture i geometrije puta realizuju se u fizičkom procesu daljinskog skeniranja putne površi i/ili ostalih površinskih, pa čak i dubljih slojeva. Zasnovane su na optičkim, akustičkim ili magnetnim fizičkim principima interakcije senzora sa uzorcima putne strukture od interesa. [52].

Kroz dosadašnje multidisciplinarne analize slojeva koji čine putnu strukturu, nametnuo se zaključak da se najbrže i najznačajnije promene koje direktno utiču na bezbednost saobraćaja dešavaju na putnoj površi [53]. U nekim istraživanjima površinska tekstura puta je ispitivana najpre sa ciljem utvrđivanja uticaja površinskog sloja puta na ponašanje vozila, i kvantifikacije interakcije između vozila (pneumatika) i agregatnog sastava putne površi [48–50].

Na osnovu toga, mnoga istraživanja, koja su obavljena radi adekvatne karakterizacije putne površi, zasnovana su na analizi teksture, i ispitivanju njenih geometrijskih karakteristika [7, 8]. Autori su, u istraživanju uzroka saobraćajnih nezgoda u Australiji, analizirali različite agregatne sastave koji formiraju teksturu i ravnost puta i došli do zaključka da je moguće smanjiti broj udesa čak od 2-8% na autoputevima do oko 30 % na putevima niže saobraćajne kategorije, uz uslov da se kvalitet teksture površi poveća upotrebom tehnike presvlačenja površi puta toplom asfaltnom mešavinom - *HMA wearing surface* [53]. U navednom istraživanju je izvršena obrada podataka o broju nezgoda koje su se već dogodile na određenim deonicama puta i na osnovu toga je utvrđena korelacija sa kvalitetom površinskog sloja.

Uvođenjem makroteksture, kao metrike za kvalifikaciju agregatno granulometrijskih karakteristika putne površi, autori su se u istraživanjima bavili poređenjem efisikanosti različitih mernih metoda, najčešće kroz stepen korelacije rezultata dobijenih različitim tehnikama akvizicije. Upoređeni su rezultati dubine teksture, dobijeni na osnovu različitih mernih tehnika (volumetrijska metoda prema standardu ASTM E965-15 [32] i lasersko profilisanje površi, prema standardima ASTM E2157-15 [37] i ISO 13974 -3 [39]) i dobijen je visok nivo korelacije rezultata [54].

U beskontaktnim metodama za dijagnostiku stanja puta najčešće se upotrebljavaju optički senzori, čiji se princip rada zasniva na akviziciji signala reflektovanih od površi koju je potrebno karakterizovati. Optičke metode su zasnovane na upotrebi stacionarnih i/ili mobilnih uređaja; laserskih sistema, LiDAR-a [55], različitih vrsta kamera [56] i satelitskih i geostacionarnih uređaja za snimanja iz vazduha [57]. Pošto su neke od ovih tehnika izvodljive samo u stacionarnom režimu merenja (ručni laserski skeneri, uređaji zasnovani na SEM (*Scanning Eletron Microskopy*) tehnici, stacionarne kamere, geostacionarni uređaji za snimanje terena), poseban akcenat se stavlja na mogućnost skeniranja puta *in situ*, sa mobilnim senzorskim uređajima, montiranim na specijalna vozila. Mobilna akvizicija se obavlja u realnom vremenu, tokom kretanja vozila duž putnog pravca, uz mogućnost manualne, poluautomatizovane ili automatizovane vizuelne inspekcije stanja putne površi [8].

Optička beskontaktna testiranja uvode nove merne tehnike za karakterizaciju površine kolovoza, kao što je predstavljeno u nedavnim studijama [58, 59], upotrebom laserskih profilometara [60], kompjuterizovanom tomografijom (CT) [61], tehnikom laserske slike [50], optičkim trodimenzionalnim skenerom [62, 63, 64] i fotometrijskom stereo tehnikom [65, 66], geostacionarnim snimanjem terena iz vazduha [67].

U poslednje vreme za karakterizaciju putne površi se najčešće koriste laserski profilimetri, koji registruju promenu profila teksture na osnovu izmerenih karakteristika incidentnog i reflektovanog snopa koherentne svetlosti [60]. Relativno nova merna procedura je upotreba ovih sistema sa vozila u pokretu [7, 8], čime se znatno smanjuje vreme dijagnostike, povećeva produktivnost u smislu dužine ispitivanih deonica i ne ometa regularan tok saobraćaja, s obzirom da se dijagnostičko vozilo kreće na isti način kao i ostala vozila na ispitivanoj deonici puta.

Uz kontinuirani napredak trodimezionalne (3D) tehnologije zasnovane na rekonstrukciji slike, komercijalni laserski linijski skeneri, primenjeni su u merenjima profila putne površi [68–71]. Istovremeno, kako bi se zadovoljile potrebe brzog testiranja, istraživači rade na razvoju sistema za trodimenzionalnu interpretaciju rezultata kod *in situ* testiranja [72, 73].

Razmatranjem dinamičkog pristupa u akviziciji signala, mobilne tehnike beskontaktnog skeniranja su jeftinije, oduzimaju znatno manje vremena, ne zaustavljaju saobraćajni tok na deonici koja se ispituje, a rezultati merenja se dobijaju u formi koja omogućava obradu signala u realnom vremenu.

Dakle, oblast interesa u ovoj disertaciji su beskontaktne metode akvizicije 1D ili 2D signala, u dinamičkom režimu skeniranja površi, s obzirom da je za potrebe detekcije degradacije promene sastava i geometrije puta, kao i posledičnog mapiranja rizika dovoljno uraditi akviziciju 1D ili 2D signala. Za potrebe algoritma predloženog u disertaciji, od veće je važnosti imati vremensko-prostornu kontinualnu akviziciju podataka, nego da li je ta akvizicija sprovedena 1D, 2D ili 3D signalima. Štaviše, 3D interpretacija i rekunstrukcija optičke akvizicije značajno povećava troškove dijagnostike. Uz to, ovaj način morfološkog pristupa karatkerizaciji putne površi, nameće zahtev za izuzetno velikim skladištima podataka, koje se odnose na 3D karakterizaciju. Važno je istaći i činjenicu da 3D pristup u interpretaciji teksture puta ne donosi potrebne rezultate u realnom vremenu kojima se može brzo i jednostavno obaviti mapiranje rizika, za potrebe autonomne vožnje. Samim tim, na osnovu parametara optičkih senzora u službi 3D analize površi, nije moguće očekivati brz odziv eventualne globalne mreže u funkciji povećanja bezbednosti u saobraćaju.

Karakterizacija teksture morfološkim pristupom, [59], pokazala je da 3D indikatori teksture daju bolju sliku od 2D indikatora i ispoljavaju veći stepen korelacije, između morfoloških karakteristika teksture i otpornosti površi na proklizavanje. Ova metoda je stacionarna i samo povezuje trenutnu 3D morfološku sliku teksture sa trenutnim stanjem otpora na proklizavanje u konkretnoj tački puta. Nema mogućnosti predikcije.

Analizu profila putne površi predstavili su i autori Gendi (*Gendy*) i Šalabi (*Shalaby*) [74-76]. Oni su predložili rekonstrukciju 2D slike za potrebe 3D morfološkog pristupa kvantifikaciji makroteksture puta. Uradili su i su poređenja sa realnim 2D indikatorima makroteksture [76]. Dobijena je procena makroteksture puta, ali u stacionarnom režimu merenja, uz promene ugla osvetljenja uzoraka, bez mogućnosti klasifikacije ili kategorizacije.

Modelovanje površinske teksture pomoću 3D rekonstrukcije laserski dobijene slike, urađeno je sa ciljem dobijanja preciznih ulaznih parametara, za kasniju moguću predikciju trenja između pneumatika i putne površi. [77]. Ova tehnika je realizovana mobilnom akvizicijom podataka sa putne površi sa submilimetarskom rezolucijom merenja, ali ne nudi rešenje modela predikcije, niti mapiranja putne površi.

Slične metodologije za karakterizaciju površinske teksture na osnovu laserskog skeniranja predstavljena su i od strane drugih autora [13, 51]. U ovim slučajevima je samo analizirana vremenska efikasnost računanja dubine srednjeg profila površi. Autori nisu radili klasifikaciju niti evaluaciju stanja putne površi.

Laseri velikih brzina akvizicije uvedeni su kao alat za proces održavanja puteva [78, 79]. Primena ovih metoda od strane autora donela je potvrdu korelacije između koeficijenta trenja putne površi i pneumatika. Pokazano je da je moguće uraditi predikciju koeficijenta trenja na osnovu stepena degradacije putne površi, ali nije uradjena njena karakterizacija, niti klasifikacija. Zaključeno je da laserko skeniranje puta mobilnom akvizicijom donosi prednost kod potreba za brzom reakcijom profesija koje se bave održavanjem puteva.

Tehnika laserskog skeniranja, za unapred poznate različite tipove asfalta, primenjena je od strane autora Bitelija (*Bitteli*) i Simona (*Simone*) [13]. Precizni 2D laserski triangularni skeneri upotrebljavaju se na inovativan način, kako bi prikupili potrebne informacije pojedinačnim merenjima. Ovde je predstavljena dijagnostička metoda sa trenutnom analizom stanja, bez klasifikacije i mogućnosti predikcije mogućih budućih oštećenja putne površi.

U eksperimentalnoj postavci zasnovanoj na upotrebi ručnog laserskog skenera [58], autori su u *in situ* uslovima izvršili skeniranje u 37 tačaka autoputeva i magistralnih puteva koji sadrže različite mešavine asfalta. Kroz ovo istraživanje, autori su potvrdili multifraktalnu prirodu granulometrijsko agregatnih karakteristika pojedinih uzoraka asfaltnih mešavina. Merenja su vršena samo u stacionarnom režimu akvizicije, na 37 konkretnih tačaka puta, pa je bilo nemoguće dobiti kontunualnu sliku promene teksture na dužoj deonici puta, a autori nisu naveli zaključak o mogućoj predikciji i mapiranju degradacija putne površi, iako se radi o deonicama sa izuzetno velikim saobraćajnim opterećenjem.

Simulacija degradacije puta različitim opterećenjem vozilima urađena je u laboratorijskim uslovima [51]. Za detekciju različitih granulometrijskih karakteristika površinskog sloja koje su kontrolisano menjane, korišćena je 3D rekonstrukcija slike dobijene laserskim skenerom. Autori su ustanovili konkretne razlike i pogoršanje kvaliteta teksture u takvim uslovima. Metoda je stacionarna, izvedena u laboratorijskim uslovima, te ne daje sliku o trendovima degradacije površinskog sloja asflata, niti se može koristiti za mapiranje puta.

Obrada slike dobijene 3D tehnikom upotrebom laserskog triangularnog ručnog lasera rađena je primenom teorije entropije [80]. Entropija se pokazala kao izvodljiv metod za 3D karakterizaciju na osnovu laserskog skeniranja makroteksture, i potvrdila prednost u opisivanju zavisnosti karakteristika teksture i otpornosti na proklizavanje. I ova tehnika se kao stacionarna, korišćenjem ručnog lasera, i malog broja uzoraka, pokazala kao nedovoljna za utvrđivanje trenda degradacije putne površi i predikcije rizika.

Autori koji su se u svojim istraživanjima bavili analizom površi puta metodama 3D rekonstrukcije slike dobijene laserskim skeniranjem uglavnom su se zadovoljili preciznom prostornom interpretacijom teksture [13, 41, 51, 62, 68-74, 76, 77, 80]. Pored uspešno realizovanih detekcija vidljive degradacije, njihova merenja su izvedena u stacionarnim režimima ili laboratorijskim uslovima, i dala su samo trenutnu sliku stanja putne površini, bez klasifikacije. S tim u vezi, nisu urađene predikcije, niti mapiranje puta prema rizičnim zonama putne površi.

Napredak u tehnikama digitalne obrade slike sa stacionarne, ili kamere u pokretu, takođe je doveo do direktnih metoda za kategorizaciju granulometrijskih promena agregatog sastava koji utiče na teksturu putne površi [39, 76].

Za klasifikaciju i kvantifikaciju površina puteva korišćene su tehnike digitalne obrade slike pomoću različitih kombinacija 2D i 3D obrade signala [58, 81].

Obrada slike dobijene video-zapisom putne površi rađena je sa ciljem prepoznavanja rupa na putu [82]. Autori su upotrebili kameru montiranu na zadnjem delu vozila, izvršili segmentaciju slike iz video-zapisa i uradili njenu 3D rekonstrukciju. Istraživanje je zasnovano na činjenici da rupe u asfaltu na slici potenciraju tamnije ivice, a sama tekstura unutar rupe se znatno razlikuje od teksture neoštećenih površinsih slojeva puta. Ovaj pristup je efikasan u pogledu detekcije vidljih i značajnih oštećenja na putu, ali nema mogućnost analize finijih promena teksture niti njene klasifikacije.

Analiza teksture površi skenirane laserskim tačkastim 1D profilometrom rađena je uz dinamičko ispitivanje trenja [44]. Na osnovu statističkih i geometrijskih indikatora makroteksture dobiojeni rezultati su samo potvrdili zavisnost izmedju profila teksture puta i otpornosti na proklizavanje.

Merenja su vršena stacionarno, bez karakterizacije površi puta, i bez mogućnosti predikcije promena njegovog sastava ili strukture.

Zavisnost između srednje dubine teksture i profila površi puta potvrđena je uporednom analizom rezultata dobijenih laserskim 1D profilometrom i volumetrijskom metod. Njihova opažanja u promenama pokazuju da se sposobnost proklizavanja smanjuje u odnosu na saobraćajno opterećenje puta [83, 84].

Proučavanje teksture i dinamike njene degradacije naročito je korisno u fazi projektovanja putne strukture, kako bi inženjeri bolje upravljali problemom proklizavanja [85]. Ovde je korišćen laserski 1D profilometar za merenje profila putne povši koja je bila potpuno nova, neotvorena za saobraćaj. Dobijen je najviši prag teksture, koji se može upotrebiti za predviđanje zavisnosti opterećenja puta, brzine vozila i stepena pohabanosti pojedinih deonica. Ovaj rezultat, ipak, nije moguće upotrebiti za preciznu klasifikaciju i mapiranje rizičnih zona puta.

Megoda (78, 79) je poredio efikasnost upotrebe kontaktnih metoda i laserskog mobilnog sistema za skeniranje puta iz vozila, čime je potvrdio korelaciju između karakteristika teksture i otpornosti površi puta na proklizavanje. Dao je mogućnost predviđanja proklizavanja, ali samo u smislu praga opterećenja puta, a pri tome nije urađena klasifikacija niti mapiranje puta.

U ovoj disertaciji je analizirana priroda 1D signala, dobijenih iz vozila u pokretu, multifraktalnim pristupom, čime je potvrđena stohastička i pseudoslučajna priroda teksture putne površi, ali je ustranovljena mulifraktalna priroda degradacionih promena teksture, u kontinuitetu duž posmatranog puta. S obzirom na profil i karakteristike snopa koherentne svetlosti, jasno je da se laserskim profilometrom može uočiti i minimalna promena na površi puta, te da je proces kontinualnog profilisanja površi u potpunosti skalabilan, u odnosu na vertikalne varijacije profila putne površi. Ovakva analiza nije pronađena u dosadašnjoj literaturi.

Karakterizacija teksture puta, izvedena je obradom digitalnih fotografija dobijenih snimanjem uzoraka putne površi [86]. Autori su zaključili da digitalno procesiranje slike daje odlične rezultate u poređenju sa klasičnim tethnikama, ali je ustanovljeno da se male promene geometrijskih karakteristika i rasporeda agregata ne mogu uočiti ovom tehnikom.

Tehnika digitalne obrade slike dobijene u pokretu, urađena je sa ciljem prepoznavanja oznaka i objekata na površi puta, odnosno u okruženju.

Klasifikacija je izvršena samo u smislu da li regije od interesa na slici pripadaju putnoj povši ili ne [87]. Nedostatak je u tome što nije urađena klasifikacija niti kategorizacija teksture putne površi.

U video-zapisu snimljenom sa površi puta [88] analizirana je i urađena klasifikacija, ali samo prema prisustvu rupa i zakrpa na putnoj površi, odnosno očiglednih promena površinske strukture, ali nije data klasifikacija finijih promena teksture.

Finije promene teksture su analizirane sa ciljem detektovanja pukotina na putnoj površi na mostu kako bi se eventualno predvidela buduća veća oštećenja [89]. Ovom prilikom nije urađena kategorizacija niti klasifikacija teksture površi, samo uočavanje promena nastalih u ranoj fazi degradacije. Metoda je sprovedena u stacionarnom režimu merenja.

Kombinacija kamere i laserskog linijskog skeniranja uvedena je za potrebe detekcije i lokalizacije očiglednih degradacija i promena putne površi tj. pukotina, koje su vidljive i “golim okom” [90]. Pokazano je da se ovim pristupom mogu uočiti i druge vidljive promene kao što su spojevi i posebne oznake na putu. Autori jesu klasifikovali i samu neoštećenu putnu površ, ali samo na osnovu značajne razlike u materijalima površinkog sloja puta. Nije bila moguća klasifikacija prema promenama nastalim samo na jednom tipu asfalta, niti predikcija novih degradacija.

Korak bliže predikciji degradacije, učinjen je običnom video-kamerom [91]. Predočena je mogućnost da se u ranoj fazi detektuje nastanak pukotina na putnoj površi. Ovde nije urađena klasifikacija površi, niti mapiranje puta.

Kamerom pametnog telefona snimana je putna površ iz vozila u pokretu, i zatim su *Support Vector* mašinom klasifikovani reparacioni blokovi putne površi, tj. zakrpe većih dimenzija. Nije urađena klasifikacija finijih promena površi, i nije predložena metoda eventualne predikcije za potrebe održavanja puteva [92].

Kamera u pokretu je upotrebljena i za prepoznavanje i probrojavanje rupa u putnoj strukturi [93]. U ovom procesu vršena je obrada slike samo tehnikom pretraživanja regiona od interesa, sa ciljem uočavanja rupa, kao vidljivih degradacija putne površi.

Detekcija rupa u putu rađena je i parking-kamerom automobila, segmentacijom frejmova iz video-zapisa [94]. U nastavku ovog istraživanja vršeno je prepoznavanje različitih vrsta pukotina, što je vodilo klasifikaciji očiglednih oštećenja, ali ne i klasifikaciji prema finijim promenama teksture putne površi.

U analizi vidljivih oštećenja na putu predstavljen je sistem za detekciju rupa koji upotrebljava tzv. *black-box* kamere [95]. Sistem može detektovati rupe u realnom vremenu, ali ne može se dobiti nikakva druga kategorizacija teksture putne površi.

Statistička analiza i obrada signala su u širokoj upotrebi za obradu podataka potrebnih za karakterizaciju putne površi [44].

Gunaratne i saradnici koristili su spektralnu gustinu snage (PSD) za karakterizaciju profila površine puta [43]. Oni su predstavili agregatne fizičke deskriptore i Furijeove transformacije koje su korišćene za karakterizaciju svojstava agregata koji se koriste u asfaltnim mešavinama. Statistički momenti kao što su aritmetička srednja devijacija, standardna devijacija, zakrivljenost (*skewness*) i zaobljenost (*kurtosis*), kao i geometrijski pokazatelji, poput prosečnog nagiba i prosečne zakrivljenosti, takođe su često korišćeni u proceni teksture površine puta [43-45].

U proceni teksture površine pojedini istraživači uradili su fraktalnu i multifraktalnu analizu površina puteva i zrnastih materijala, posmatrajući profile površinske teksture kao fraktalni skup i računali potencijalne fraktalne dimenzije agregatnog sastava putne površi [58, 96-99]. Analiza teksture puta rađena je pomoću fraktalnih deskriptora višestruke rezolucije, u procesu dekompozicije originalnih slika [100], premda su ovo samo pionirski rezultati u oblasti beskontaktne optičke dijagnostike.

U multifraktalnom pristupu analizi makroteksture, autori su izabrali tri karakteristična parametra multifraktalnog spektra [58]. To su: fraktalna dimenzija, horizontalna razlika početne i krajnje tačake spektra i nagib u krajnjoj tački spektra, kroz odnos $\Delta\alpha$ i $\Delta f(\alpha)$. Pokazalo se da se multifraktalnom analizom triju parametara bolje uočavaju neregulanosti asfalta nego klasičnim posmatranjem, mada je korelacija bila značajna. Na ovaj način, oni su pokazali da pojedinačni uzorci ili blokovi putne površi ispoljavaju multifraktalne osobine u skali makroteksture [4, 11].

U ovoj disertaciji je potvrđena multifraktalna priroda agregatnog sastava na celoj ispitivanoj dužini puta, a, uz to, ustanovljena je i multifraktalna priroda promena teksture, koje najčešće nastaju postepenom degradacijom površinskog sloja.

Sa brzim razvojem 3D tehnologije u analizi površine kolovoza, karakterizacija promena teksture može se sprovesti Furijeovom analizom [61], i statističkim metodama u analizi i obradi slike na osnovu ektrakcije obeležja teksture [101, 102].

Poslednjih godina, Šenonova (*Shannon*) teorija entropije se koristi u obradi slike kao moćno sredstvo [103-105] pogodno za opisivanje složenosti teksture putne površi. Uvođenje teorije entropije u ovu oblast omogućava bolji uvid u propadanje i ponašanje površinskih slojeva puta. Trebalo bi naglasiti da je uz teoriju entropije, slika površi puta analizirana i pomoću matrice koincidencije [101] i matrice razlike sivih nijansi [102].

Dosadašnje studije o strukturi i geometriji puta, u kojima su korišćeni različiti numerički i istraživački pristupi, nisu u potpunosti objasnile mehanizam degradacije putne površi, tako da promene teksture puta još uvek nisu u potpunosti kvantifikovane u praksi.

Dostupna literatura o automatizovanoj detekciji oštećenja površine puta uglanom se realizuje inspekcijom pojedinačnih slika i/ili video- klipova [87].

Analiza pojedinačne slike zasniva se na akviziciji stacionarnom kamerom, tako da se može identifikovati i fina promena teksture. Statička slika ili fotografija se češće analizira od video-zapisa, jer se promene u teksturi lakše detektuju, a analiza obeležja teksture može odrediti sastav, strukturu i kvalitet površine [86].

Obrada slike na osnovu analize njene teksture često se zasniva na metodama koje se upotrebljavaju za ekstrakciju obeležja teksture. U praksi se izvodi analiza sličnosti između vektora obeležja. Karakterizacija teksture se vrši na osnovu statističke obrade podataka koji zavise od obeležja teksture slike, a uz primenu odgovarajućih deskriptora ili transformacija [86].

U ovoj disertaciji, ispitane su i primenjene četiri metode za obradu video-frejmova, koje se odnose na ekstrakciju obeležja slike. Metode koje su upotrebljene jesu: Gaborova transformacija, koja se često naziva Gaborova banka filtara ili Gaborova funkcija [106, 107]; transformacija talasićima (*WaveletTtransform* – WLT) [45, 108]; matrica kopojavljivanja nivoa sivog (Gray Level Co-occurrence Matrix – GLCM) [109] i ivični histogram, odnosno, histogram ivica objekata od interesa na slici (*Edge Histogram Descriptor* – EHD) [110, 111]. U zavisnosti od stohastičke prirode površina puteva, ovi pristupi izdvajanja obeležja treba da obezbede adekvatnu predobradu za klasifikaciju teksture površine puta. Metode zasnovane na multirezolucijskoj/višekanalnoj analizi, kao što su Gaborova transformacija i WLT, uvedene su kao piramidalno strukturirane transformacije za analizu teksture [110-112].

U nekim analizama površi puta metoda transformacije talasićima (WLT) primenjena je radi određivanja odgovarajućeg nivoa kvaliteta, detekcije i promene teksture, i njene klasifikacije i segmentacije [113-116].

Analiza makroteksture koja je obavljena kontaktnim pristupom, zasnovana je na primeni WLT na ceo skup podataka, što je omogućio dekompoziciju talasićima u više nivoa [45]. Nedostatak ovakve analize je u stacionarnom pristupu merenjima i nemogućnosti predikcije i mapiranja puta.

Metoda WLT primenjena je u kvantifikaciji agregatne teksture površine čestica korišćenjem 2D slika u sivoj skali [81]. Ovde je slika dobijena SEM tehnikom. Autori su uočili razliku između poliranih i nepoliranih agregata, ali je ceo ekperiment obavljen u stacionarnom režimu u laboratorijskim uslovima, tako da nema mogućnosti za kontinualnu analizu, i predikciju rizičnih zona.

Drugi autori su takođe koristili WLT analizu sa ciljem trodimenzionalne karakterizacije teksture jezgara betona (PCC), snimljenih u stacionarnom režimu putem kompjuterizovane tomografije (CT) [61].

Istraživači opisuju upotrebu Gaborovih filtara različitih skala [117], različite orijentacije i dimenzije kernela, [107, 118] u svrhu segmentacije teksture i njene karakterizacije [119]. Gaborova transformacija ili upotreba Gaborove banke filtara, primenjena na sliku teksture, je veoma koristan alat, jer poseduje optimalna svojstva lokalizacije u vremenskom i frekvencijskom domenu.

Gaborovi filtri obezbeđuju sredstva za bolju prostornu lokalizaciju, ali je njihova efikasnost u praksi ograničena, budući da obično ne postoji jedinstvena rezolucija filtara gde se može lokalizovati prostorna struktura, naročito u prirodnim teksturama. Ove metode uključuju transformaciju originalnih slika koristeći filtre i izračunavanja energije transformisanih slika. Koristi se maska, takozvano "jezgro konvolucije" (*convolution kernel*), koja predstavlja filtar [118]. Gaborov talasić koji se koristi u 2D-u uportebljava se za ekstrakciju lokalnih karakteristika slike, kao što je opisano i u prethodnim istraživanjima [119-121]. Međutim, sve dosadašnje analize putne površi bazirane na Gaborovim transformacijama imale su pozitivne rezultate samo u slikama dobijenim stacionarnom kamerom.

Matrica koeficijenta zajedničkog kopojavljivanja nivoa sivog - *The Gray Level Co-Occurrence Texture Matrix* (GLCM) je uobičajena metoda za ekstrakciju obeležja teksture, zasnovana na udaljenosti između piksela i njihovoj orijentaciji [122]. *The Gray Level Co-ocurrence matrix* metoda je način izdvajanja statističkih obeležja teksture drugog reda (uključujući i analizu poređenja na dva piksela - *two-pixel comparison analysis*). Ovo je veoma korisna metoda za određenu ekstrakciju obeležja teksture [119-123]. Prvi korak je da se odrede zajednička pojavljivanja (kopojavljivanja - *co-occurring*) verovatnoće svih kombinacija parova kvantifikovanih nivoa sive u prostornom prozoru fiksne dimenzije, uz dva parametra, udaljenost između piksela i orijentaciju. Algoritam implementiran u ovoj disertaciji se zasniva na pristupu koji je opisan od strane nekoliko autora [115, 116, 124]. U matematičkoj formulaciji, najčešći elementi koji se izdvajaju iz GLCM su entropija, energija, kontrast, korelacija i lokalna homogenost [124]. Ekstrakcija vektora obeležja teksture i njihova statistička obrada ovakvim pristupom imala je efekta samo kod očiglednih promena u sastavu i geometriji putne površi.

Deskriptor teksture ivice histograma (*Edge histogram descriptor - EHD*) sličan je deskriptoru rasporeda boja (*color layout descriptor* - CLD) prema principu detektovanja prostorne distribucije ivica [125]. EHD je dobar činilac koji doprinosi ekstrakciji teksture, koristan za obradu slike, čak i kada osnovna tekstura nije homogena. U *MPEG-7* standardu je predložena metoda histograma ivica (*EHD*), koja upotrebljava pet filtara [125]. S obzirom na pristup u EHD analize slike, karakterizacija teksture putne površi je moguća samo u slučajevima specifičnih granulometrijskih karakteristika putne površi, kada je moguća detekcija ivica pojedinačnih agregatnih čestica.

Temperatura se koristi kao važan parametar u proceni kvaliteta putne površine, kao i za predviđanje mogućih defekata kao što su pukotine i rupe, i drugih parametara kao što su otpornost na klizanje, nivo klizanja i koeficijent trenja [126]. Otpornost na klizanje, kod površina koje se sastoje od različitih asfaltnih i betonskih kompozita, smanjuje se sa povećanjem temperature površine [127]. U programima procene i kategorizacije puteva, temperatura površine se obično meri iz pokretnih vozila, najčešće istovremeno sa upotrebom drugih senzora ili uređaja za dijagnostiku putne infrastrukture [8].

Veoma je mali broj objavljenih naučnih istraživanja o predviđanju rizika na putevima sa mapiranjem puta. Većina studija koristi podatke o sudarima kao glavne ulazne podatke za određivanje nivoa rizika. Jedan upotrebljiv algoritam zasnovan je na SVM (*Support Vector Machine*) algoritmu mašinskog učenja i tehnologiji obrade i segmentacije slike, gde autori predlažu metod tehnologije obrade video slike za prepoznavanje stanja površine puta (npr. bez obzira da li je površina puta mokra ili suva, ili ako je sneg, ili led na putu) [128]. Model predviđanja nivoa otpornosti na proklizavanje u zavisnosti od drugih činilaca (starost putne površi, saobraćajno opterećenje na dnevnom nivou i minimalne granulometrijske karakteristike agregata) razvijen je u istraživanju puteva nižeg reda u Španiji [129]. Nedostatak uočen u oba prethodna istraživanja sastoji se u tome da su svi ulazni podaci dobijeni nakon nekoliko godina praćenja njihovih promena. Primenjana je linearna regresija, ali je nemoguće ovakve modele upotrebiti u predikciji rizika i mapiranju puta, pogotovo ako se radi o relativno kratkom dozvoljenom vremenskom periodu.

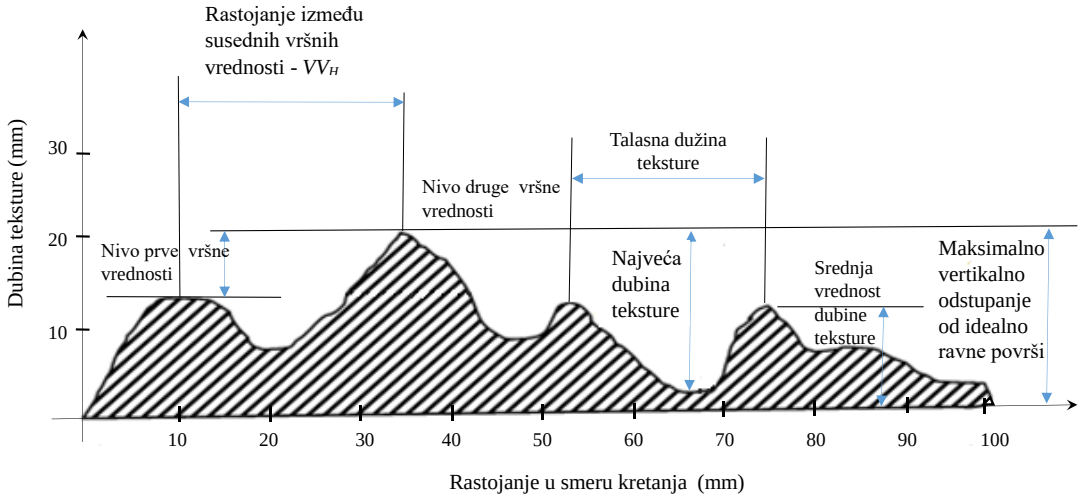
U zaključnom razmatranju ovog poglavlja značajno je naglasiti da nijedno od pomenutih sprovedenih istraživanja ne sadrži metodologiju koja spaja akviziciju u pokretu, analizu video-signala i segmentaciju video-frejmova, ekstrakciju obeležja i, na kraju, finu klasifikaciju putne površi prema teksturi koja je snimljena iz vozila. Takođe, u pomenutim istraživanjima, do danas nema radova koji govore o predikciji i mapiranju rizika, na osnovu eksperimentalne postavke realizovane kao u ovoj disertaciji.

Drugi autori su se orijentisali uglavnom na stacionarna merenja, poređenja mernih metoda i ocenu njihovih korelacija, dok su u mobilnom beskontaktnom pristupu, samo obrađivani i opisivani slučajevi degradacija ili očiglednih promena na površi puta, uz moguće prisustvo drugih materijala toj površi.

U ovoj disertaciji je predložen algoritam za predikciju rizika od proklizavanja na određenim deonicama puta, nakon čega je urađeno mapiranje puta i podela puta na segmente: niskog, srednjeg i visokog rizika.

4. Algoritam za klasifikaciju putne površi zasnovan na multifraktalnoj analizi makroteksture

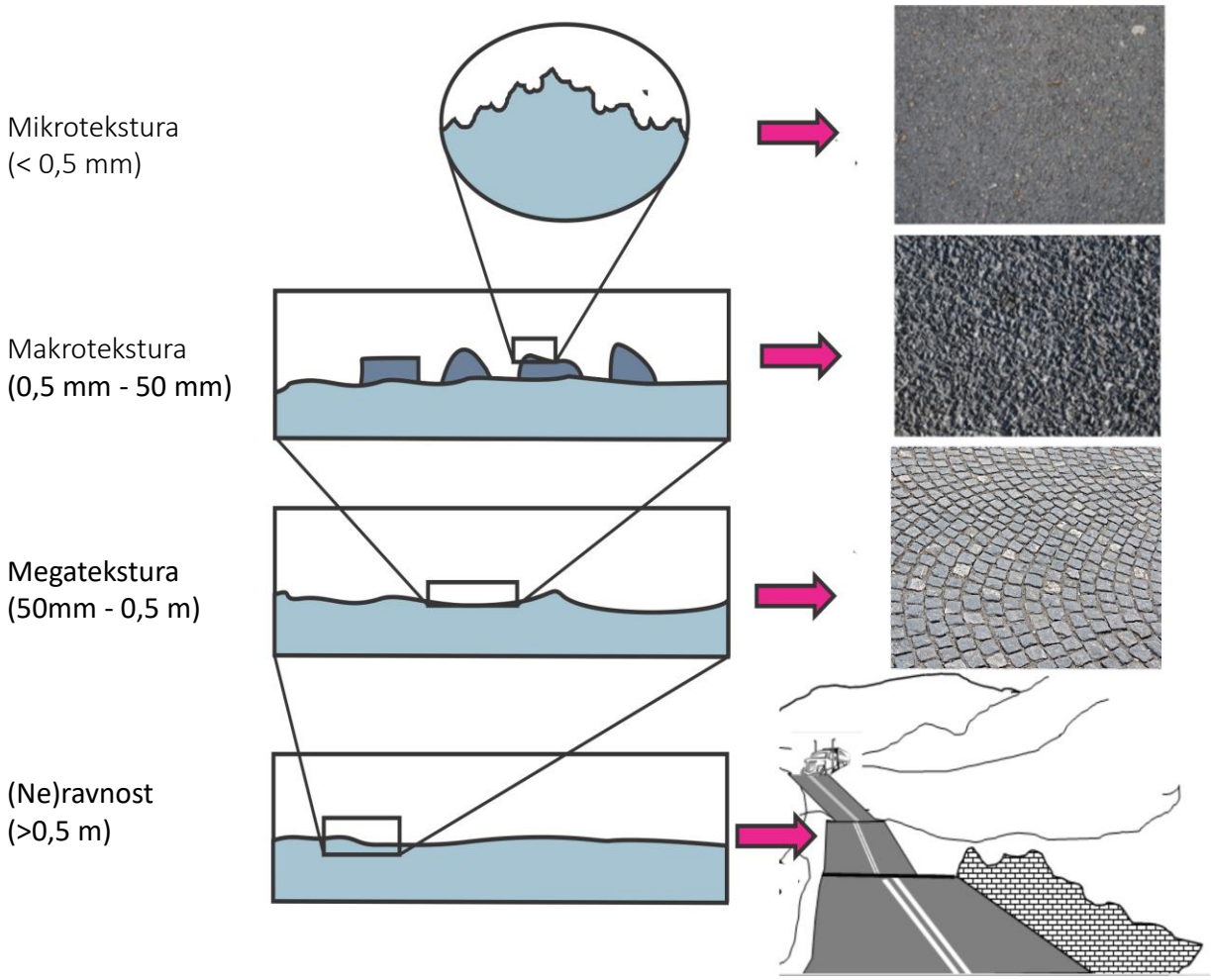
Tekstura puta se može najbolje predstaviti posmatranjem vertikalnog profila površinskog sloja puta na nekom segmentu, duž putnog pravca [4, 53. Na taj način se uočavaju vertikalna odstupanja koja se mogu okarakterisati kao dubina teksture, što je pokazano na slici 4.1. Uzorak teksture se posmatra na konačnoj površini puta i direktno zavisi od veličine, oblika i raspodele agregatnih zrna i mešavina koje čine sastav površinskog sloja. Tekstura površi predstavlja se u nekoliko skala, reda 0, 1 mm do 500 mm, u zavisnosti od geometrijskih karakteristika strukture puta [4].



Slika 4.1. Vertikalni presek površinskog sloja duž putnog pravca [4].

Promena dubine teksture duž puta, može se u širem smislu posmatrati kao stacionarna, pseudoslučajna funkcija.

Tekstura se često reprezentuje svojom talasnom dužinom. Ona je definisana kao minimalno rastojanje između periodično ponovljenih odstupanja profila površi kolovoza [4, 13]. Važno je napomenuti da je, prema postojećim standardima, talasna dužina teksture definisana kao inverzna prostorna frekvencija, predstavljena jedinicom m^{-1} [9-11]. U odnosu na opsege talasnih dužina i amplitude odstupanja vertikalnog profila puta, tekstura se može razvrstati u četiri glavne geometrijske skale: mikrotekstura, makrotekstura, megatekstura i ravnost, što je prikazano na slici 4.2. [4, 11, 83]



Slika 4.2. Geometrijske karakteristike teksture putne površi, u skladu sa standardom ISO 13473-1 [4].

Mikrotekstura površi je periodična nepravilnost sa talasnom dužinom koja je manja od 0,5 mm i amplitudom vertikalnih odstupanja u opsegu od 0,01 mm do 0,5 mm [83].

Makrotekstura površi je periodična nepravilnost sa talasnom dužinom, čije su vrednosti u opsegu od 0,5 mm do 50 mm, i amplitudom vertikalnih odstupanja 0,1 mm do 20 mm [83].

Megatekstura površi je periodična nepravilnost sa talasnom dužinom, čije su vrednosti u opsegu od 50mm to 500 mm, i amplitudom vertikalnih odstupanja od 0,1 mm do 50 mm. Geometrijske karakteristike ovog tipa teksture su reda veličine površine koja nastaje prijanjanjem pneumatika na putnu površ [83].

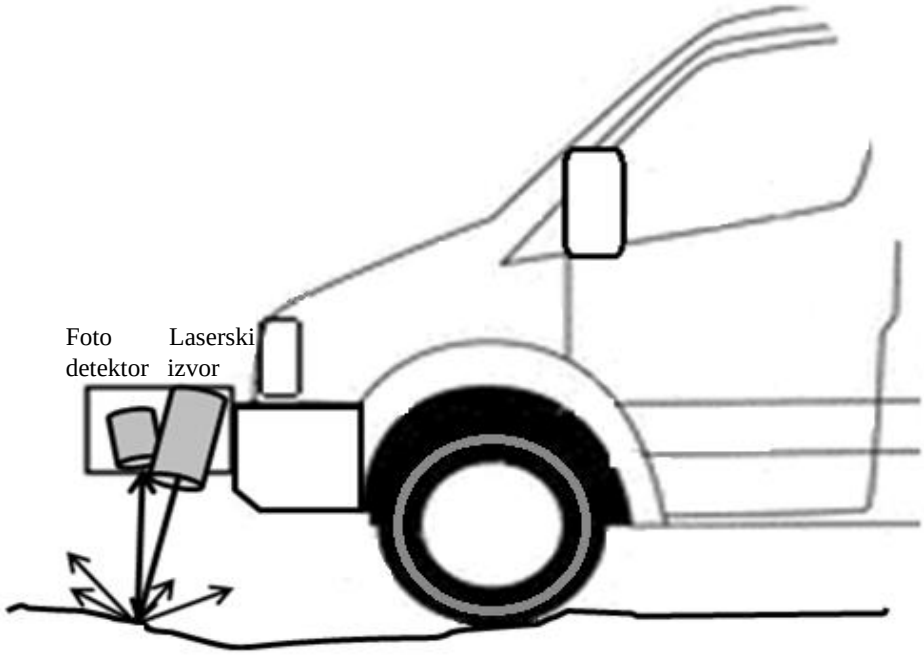
Odstupanja putne površi s većim periodičnim i amplitudskim odstupanjima od megateksture, odnose se na promene geometrijskih osobina koje se opisuju pojmom stepena ili indeksa ravnosti [7, 39, 130]. To podrazumeva odstupanje prema talasnim dužinama reda 0,5 m to 50 m, a amplitude mogu biti čak i do nekoliko metara.

Podrazumeva se da su novi površinski slojevi puta projektovani i izrađeni sa dovoljnom dubinom profila površi, kako bi se dobile odgovarajuće karakteristike koje utiču na kretanje vozila [4].

Makrotekstura se dobija podesnim doziranjem agregata i bitumena, kao i drugih kompozitnih slojeva, i podrazumeva specijalne finalne tehnike u površinskim radovima na završnim slojevima puta.

U ovom poglavlju je predstavljen jedan pristup u analizi kvaliteta putne površi karakterizacijom makroteksture. Ova analiza potvrđuje da makrotekstura pojedinačnih uzoraka asfaltnih mešavina ima multifraktalna svojstva, kao što je to pokazano u ranijim istraživanjima [58, 96-98]. Učinjen je korak dalje u smeru karakterizacije putne površi multifraktalnim pristupom u analizi pseudoslučajnog signala dobijenog pokretnom akvizicijom. Optički sistem za dijagnostiku puteva opremljen je laserskim uređajem za skeniranje putne površi sa visokom rezolucijom merenja, koja omogućava direktno profilisanje površi puta [78, 79].

U ovom poglavlju, vršena su dinamička merenja prema preporukama datim u standardizacionoj regulativi [10, 11, 31-40]. Laserski profilometar je deo multisenzorske platforme postavljene na vozilo za prikupljanje podataka iz putne mreže. Osnovni princip merenja prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Osnovni princip metode merenja profila teksture prema ISO 13473 (poglavlja 1, 2, 3), ASTM E950-98 (2004) i ASTM E1845-01 (2005).

Ova analiza dokazuje da se skeniranjem putne površi sa mobilne platforme, može uočiti određeni diskontinuitet u kvalitetu teksture duž posmatranog puta, što može biti od značaja za procenu sigurnosti komplete putne infrastrukture. U analizi su primenjene različite statističke metode, kao i multifraktalna analiza, za opis i karakterizaciju makroteksture putne površi. Ovaj pristup takođe bi mogao omogućiti efikasniju analizu i automatizaciju klasifikacije i kategorizacije kompletne putne mreže.

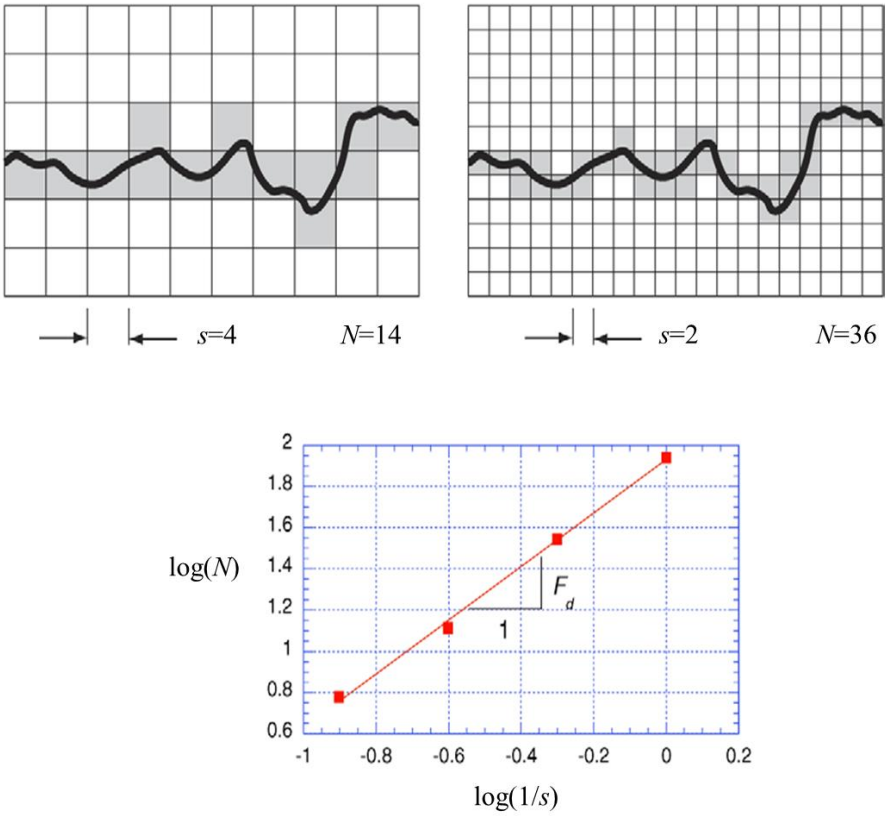
4.1 Multifraktalni okvir

Većina nelinearnih ili pseudoslučajnih procesa se može opisati analizom koja se zasniva na fraktalnom pristupu. Uočljivo je da mnogi od njih imaju različite fraktalne karakteristike u različitim vremenskim, prostornim, ili drugim razmerama [131]. Kao rezultat ponašanja takvog nelinearnog sistema postoje karakteristike koje se mogu objasniti neujednačenim raspodelama [132]. Multifraktalna analiza se može koristiti za proučavanje dinamike varijabilne strukture, njenih dugoročnih i kratkoročnih zavisnosti, i za karakterizaciju promenljivih koje predstavljaju proces, u okviru multifraktalnog okvira [132-136]. Lokalne i globalne karakteristike neke promenljive su opisane statističkim svojstvima nepravilnosti koje se nalaze u promenljivoj strukturi. Opis lokalnih i globalnih karakteristika može se realizovati u formi njihovih opštih dimenzija (lokalne osobine) i njihovog spektra singularnosti (globalne osobine).

Multifraktalna analiza se može realizovati primenom različitih algoritama. Jedna od metoda koje se često primenjuju za izračunavanje multifraktalnih karakteristika signala jeste *box counting* metoda, tzv. prebrojavanje boksova (kvadrata) [133]. Izračunavanje karakterističnih multifraktalnih parametara primenom ove metode zasniva se na sledećoj proceduri: podaci dobijeni u izmerenim vremenskim serijama prekriju se kvadratima dimenzije s (rešetka), kao što je to prikazano na slici 4.4 [134]. Svaki kvadrat koji sadrži određenu mernu vrednost se broji i doprinosi sumi, predstavljenoj brojem μ_i (s).

Ova promenljiva se može uvesti kao verovatnoća merne vrednosti μ pozicionirane u i-tom

kvadratu.



Slika 4.4. Primer primene *box counting* metode za izračunavanje fraktalnih parametara krive. Na grafiku ispod je prikazan način računanja fraktalne dimenzije signala, *Fd* [133].

Merna vrednost i dimenzije kvadrata su povezane, a njihov odnos se predstavlja stepenom relacijom,

$$\mu_i(s) = s^{\alpha_i}, \tag{4.1}$$

gde α_i predstavlja grubi Holderov eksponent i reprezentuje fraktalnost strukture, dat izrazom (4.2) [135].

$$\alpha_i = \frac{\ln(\mu(s_i))}{\ln(s)}. \tag{4.2}$$

U graničnom slučaju,

$$\alpha = \lim_{s \to 0}(\alpha_i). \tag{4.3}$$

Parametar α opisuje lokalnu pravilnost strukture, a zavisi od trenutne pozicije unutar nje. Postoji mogućnost da ista vrednost α može postojati na različitim pozicijama unutar strukture. Dakle, zanimljivo je izračunati raspodelu α unutar izmerene strukture, što se predstavlja multifraktalnim spektrom, koji daje prikaz globalne regularnosti. Multifraktalni spektar se analizira kao funkcija koja zavisi od parametra α, odnosno kroz parametre koji opisuju krivu – f(α). Algoritam za izračunavanje spektra višestrukih singulariteta može se objasniti na primeru *box counting* metode. Ako je $N(\alpha)$ broj kvadrata (u graničnim procesnim tačkama) i vrednost intenziteta singularnosti je u opsegu [α, $\alpha+d$] sa verovatnoćom P_i, onda f(α) predstavlja fraktalnu dimenziju opisane strukture po vrednosti α:

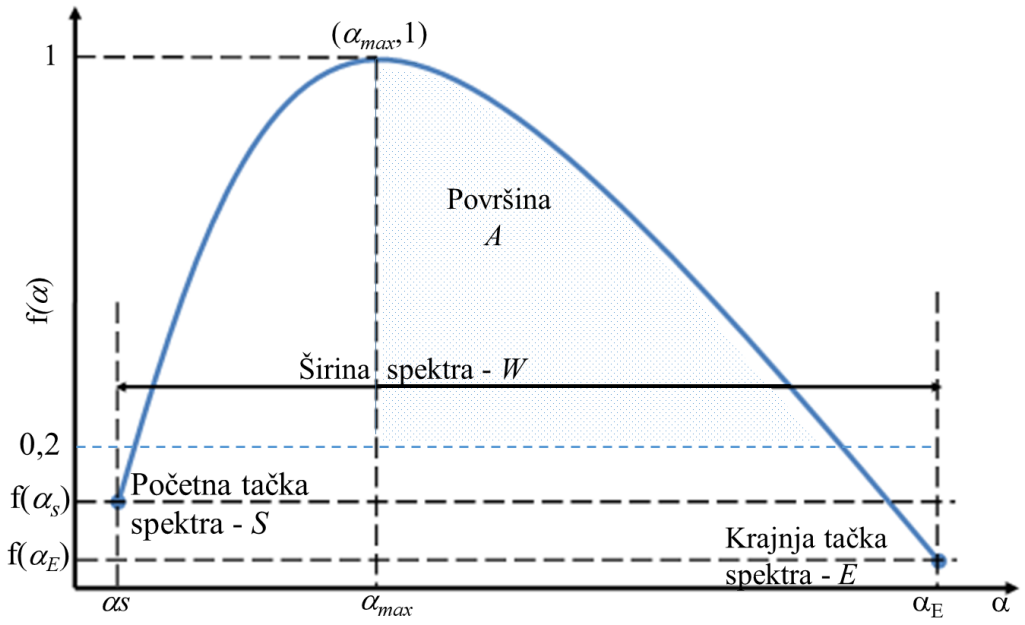
$$N(\alpha) = s^{\mathrm{f}(\alpha)}. \tag{4.4}$$

Raspodela parametra α u celoj strukturi se onda može predstaviti krivom multifraktalnog spektra i sledećim parametrima:

$$\mathrm{f_s}(\alpha_i) = -\frac{\ln(N_s(\alpha_i))}{\ln s} \;\Rightarrow\; \mathrm{f}(\alpha) = \lim_{s \to 0} \mathrm{f}_s(\alpha_i). \tag{4.5}$$

Na osnovu prikazanog formalizma, multifraktalna mera se može definisati u vidu Hausdorfove (*Hausdorff*) dimenzione raspodele eksponenta α [132].

Jedan od primera izračunatog multifraktalnog spektra, prikazan je na slici 4.5 [136]. Širina spektra (W) opisuje interval α vrednosti sa kojim se opisuje struktura signala. Početna i krajnja vrednost f(α_S) i f(α_E) krive spektra označavaju verovatnoću pojave singulariteta s najnižom i najvišom vrednošću, respektivno. Prisustvo i intenzitet singulariteta utiču na oblik multifraktalnog spektra. U ovoj analizi upotrebljena su dva algoritma za izračunavanje spektra, prvi baziran na Ležandrovoj (*Legendre*) transformaciji i drugi baziran na velikim odstupanjima (*Large deviation spectrum*) [136, 137].



Slika 4.5. Tipična kriva multifraktalnog spektra s karakterističnim parametrima koji ga opisuju [136].

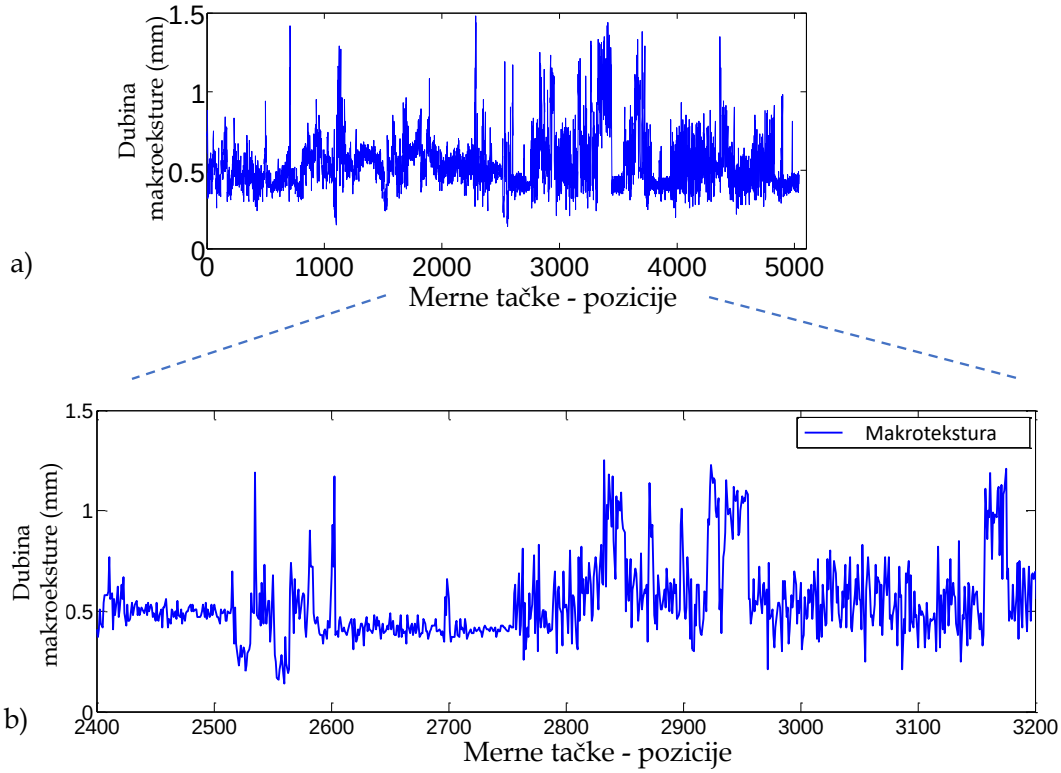
4.2 Akvizicija podataka

U ovom odeljku je izložena dinamička merna procedura sa prikupljanjem podataka koji čine vremensku seriju. Merenja su vršena profilometrima sa laserskim sistemima za skeniranje sa velikom brzinom akvizicije, postavljenim na vozilu. Podaci su prikupljeni tokom kretanja vozila na površini puta, kontinuirano, duž puta od 500 km. Laserskim profilometrom radne frekvencije od 64 kHz izvršena je akvizicija signala pri brzini od oko 60 km/h. Osnovni elementi radne stanice su laser velike brzine okidanja, elektronika za obradu signala i računar, nakon čega sledi postprocesiranje, koje kao rezultat daje konačnu ocenu stanja putne površi. Radna stanica je referencirana GPS koordinatama. Operater može pojedinačno izabrati interval merenja. Operater može izvršiti i naknadnu obradu podataka u svrhu karakterizacije površi puta. U ovom poglavlju analizirani su pristupi u obradi signala, koji obezbeđuju potpunu ili delimičnu automatizaciju inspekcije podataka sa putne površi.

S obzirom na to da se podaci očitavaju na svakih 100 m, postoji ukupno 5000 mernih pozicija, na kojima je izmerena trenutna dubina teksture. Dakle, merna sekvenca sadrži 5000 vrednosti, prikupljenih duž puta kojim se kretalo merno vozilo. Podaci o dubini makroteksture, prema pozicijama na kojima je očitavana, prikazani su na slici 4.6.

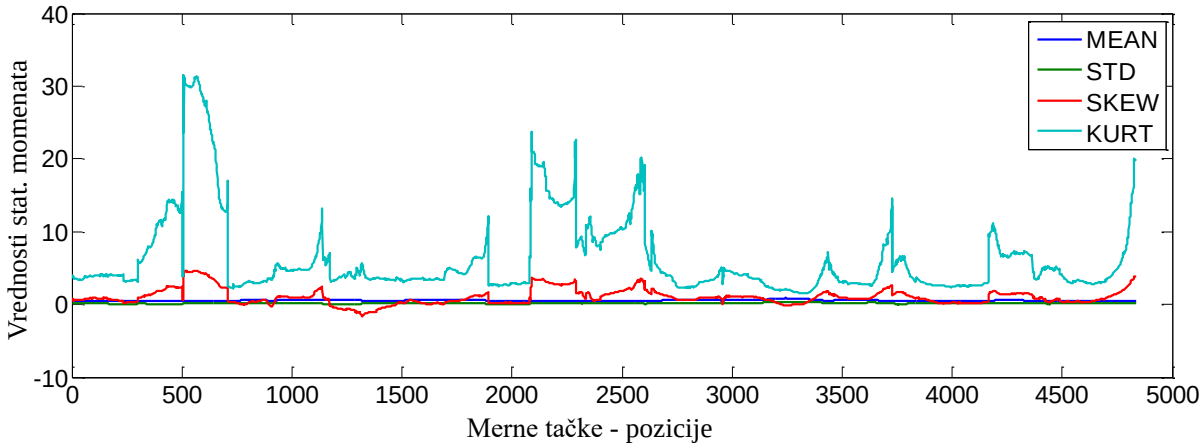
Podaci su analizirani klizajućim prozorom, koji zahvata dve stotine uzastopnih merenja, odnosno dve stotine pozicija duž puta. Klizajući prozor je pomeran za jedan uzorak intervala, tj. za jednu poziciju [138].

Primenjene su standardne metode deskriptivne statistike. Rezultati analize merenja dubine makroteksture statističkim alatima, isključujući početne i krajnje tačke, pokazani su na slici 4.7.



Slika 4.6. a) Promena profila putne površi na celom putu, b) promena na jednoj izabranoj deonici puta, od merne pozicije 2400 do 3200.

Izračunati su momenti deskriptivne statistike. Korišćena su četiri momenta (srednja vrednost -MEAN, standardna devijacija - STD, *skewness* – SKEW i *kurtosis* -KURT uz upotrebu klizajućeg prozora od 200 pozicija tj. mernih tačaka.



Slika 4.7. Momenti deskriptivne statistike izračunati za podatake o dubini teksture.

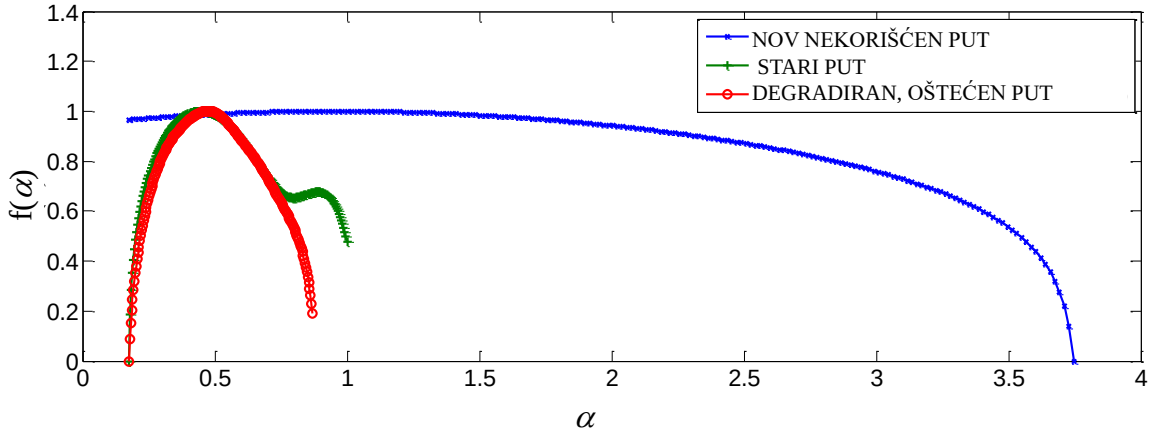
Nažalost, za nelinearne procese ovi statistički parametri nisu pogodni za opisivanje i analizu lokalne strukture [131]. Deskriptivna statistika pruža mogućnost analize uzorka na globalnom nivou. Statistički mometni ne mogu pružiti uvid u lokalnu strukturu signala.

Iz tog razloga, dalja istraživanja u ovoj analizi bila su usmerena na nelinearne metode kao što su fraktalna i multifraktalna analiza.

4.3 Ležandrov pristup za klasifikaciju makroteksture

Multifraktalni spektri tri karakteristična stanja površine puta – nove, stare i degradirane prikazane su na slici 4.8. Izračunati multifraktalni spektri, po svom obliku, ukazuju na postojanje značajnih razlika između ove tri vrste površi puta. Značajna širina spektra u slučaju "nove" površi puta, ukazuje na veliki raspon α vrednosti za posmatranu teksturu, što upućuje na visoku varijabilnost makroteksture.

Takvu strukturu karakterišu značajne relativne promene malih varijacija signala. Ovo se objašnjava činjenicom da je ovakva površ nova, lokalno neistrošena saobraćajem i vremenskim uslovima, i neoštećena.



Slika 4.8. Multifraktalni spektri tri uzorka površi puta, sa „novim", „starim" i „degradiranim" površinskim kolovoznim slojem.

Posmatrajući oblik krive s leve strane, ovi spektri imaju karakteristično visoku početnu vrednost f(α). Smanjenje kvaliteta površi puta, dovodi do sužavanja spektra, kao rezultat degradacije površinskog sloja asfalta, odnosno smanjenja granularnosti. Profil površi je nižih amplituda, što ukazuje na manju dubinu teksture, tako da su izmereni singulariteti nižih vrednosti, a površina puta bliža idealno ravnoj. Neki segmenti površi puteva mogu prouzrokovati širi spektar i pojavu dva različita procesa u nizu merenja unutar kliznog prozora (postojanje dva maksimuma u spektru).

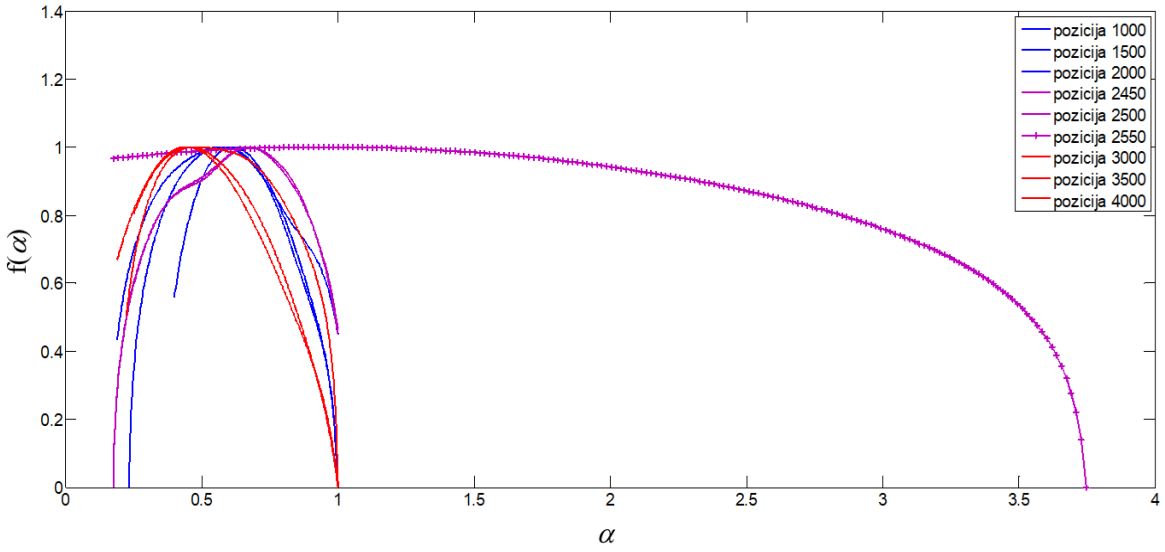
Od parametara kojima se opisuju multifraktalni spektri, ovde su analizirani: položaj maksimuma, ukupna površina ispod multifraktalnog spektra, površina između krive spektra i prave na visini f(α)=0,2; širina spektra, pozicija početne i krajnje tačke spektra.

Ovi parametri daju precizan uvid u lokalnu strukturu signala. Položaj maksimuma ukazuje na singularitete unutar signala sa najvećom verovatnoćom pojavljivanja [136].

Površine ispod krivih spektara pokazuju kumulativno opseg vrednosti singulariteta i verovatnoću pojavljivanja. Širina spektara zahvata interval α vrednosti singulariteta kojima je opisan signal. Pozicije početne $S(\alpha_S, f(\alpha_S))$, i krajnje tačke $E(\alpha_E, f(\alpha_E))$, ukazuju na verovatnoće pojavljivanja singulariteta sa najmanjom i najvećom vrednošću parametra α, respektivno.

Na osnovu merenja sa različitih deonica, dobijeni multifraktalni spektri su posmatrani u analizi pomeranja maksimuma, promena ukupne površi ispod krive i promena površi (A) između desnog dela krive spektra i odgovarajuće prave na poznatoj i unapred definisanoj vrednosti, što je pokazano na slici 4.5. Vrednost $f(\alpha)=0{,}2$ izabrana je kao referentna u odnosu na vrednosti početne tačke svakog od spektara. Ovo je dobijeno na osnovu ranijih istraživanja, u kojima je uočena optimalna prava $f(\alpha)=0{,}2$ ispod koje vrednosti tačaka krive spektra nisu upotrebljive za dalju analizu [136].

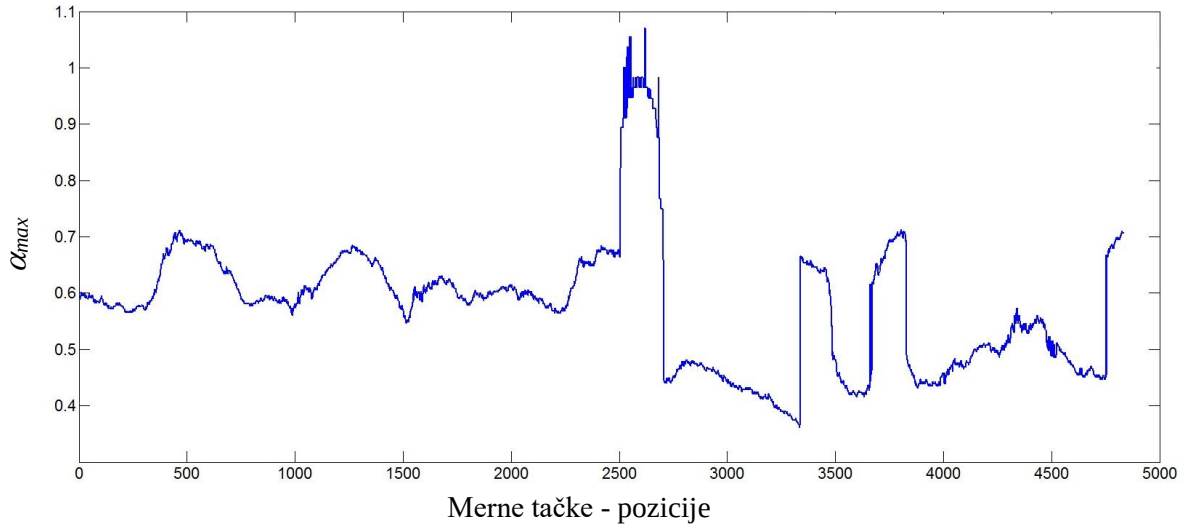
Na slici 4.9. su prikazani multifraktalni spektri, koji se odnose na pojedine deonice analizirane putne površi.



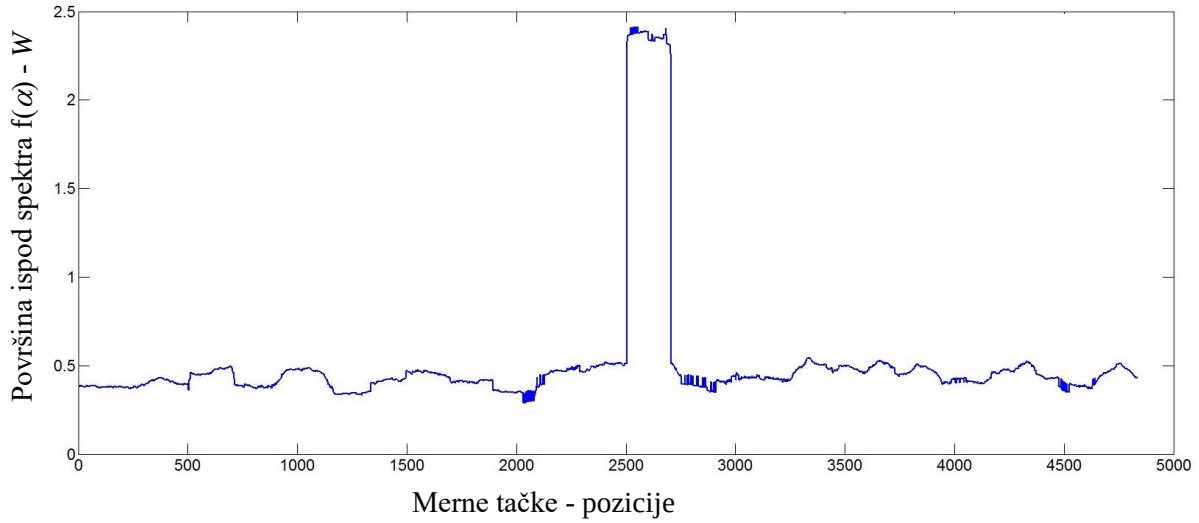
Slika 4.9. Multifraktalni spektri, koji se odnose na deonice analizirane putne površi u razmaku od 1000. do 4000. merne pozicije.

Za svaki od karakterističnih parametara uočavaju se naglašene promene vrednosti na pozicijama merenja oko 2500 i 2700, što ukazuje na značajnu lokalnu promenu makroteksture, odnosno kvaliteta površi puta. Radi jasnog prikaza rezultata dalje analize, fokus se stavlja na poziciju oko 2700.

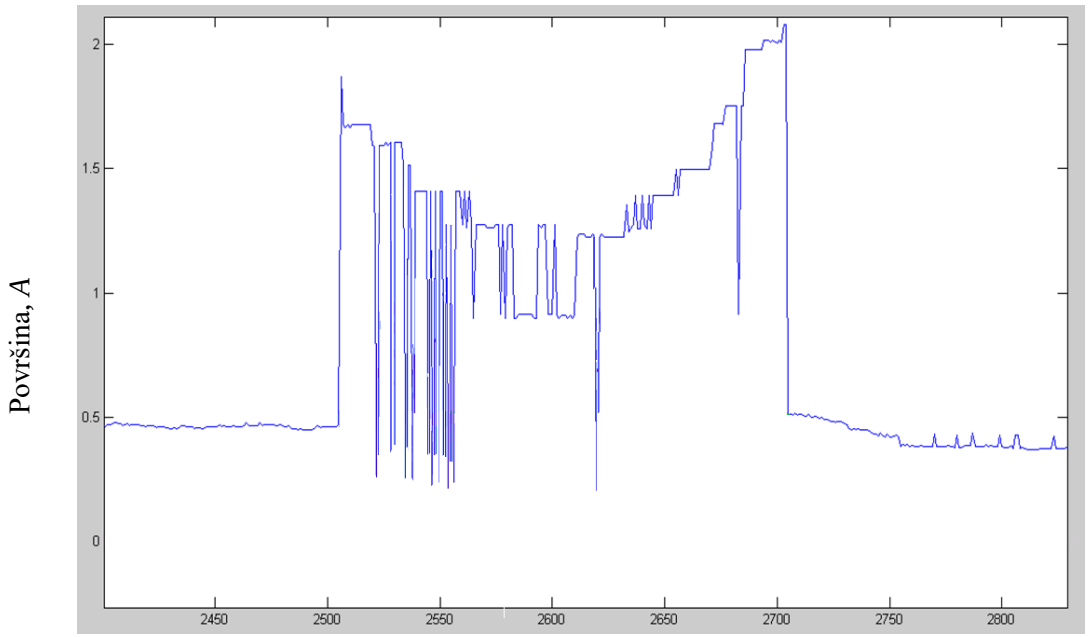
Kombinacijom različitih parametara koji opisuju spektre prozora, može se dobiti trodimenzionalni prikaz iz kojeg se jednostavno mogu uočiti potencijalni klasteri tačaka, kao što je to prikazano na slici 4.13.



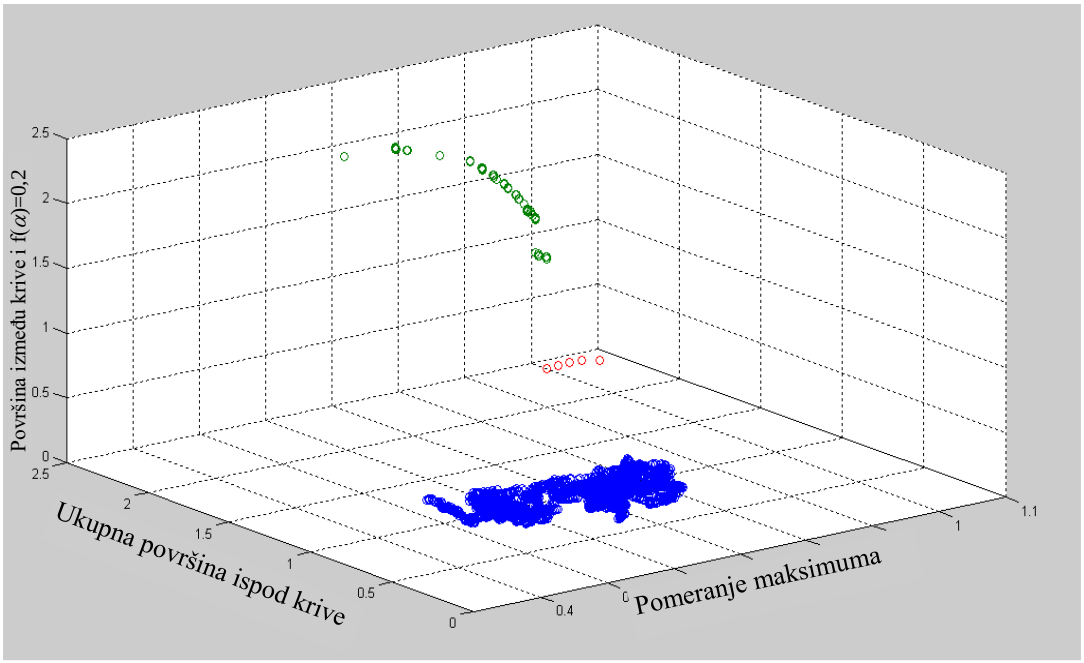
Slika 4.10. Promena vrednosti α, za maksimume spektra f(α_{max}), pri pomeranju prozora duž posmatranog puta.



Slika 4.11. Promena ukupne površine ispod krive spektra duž posmatranog puta.

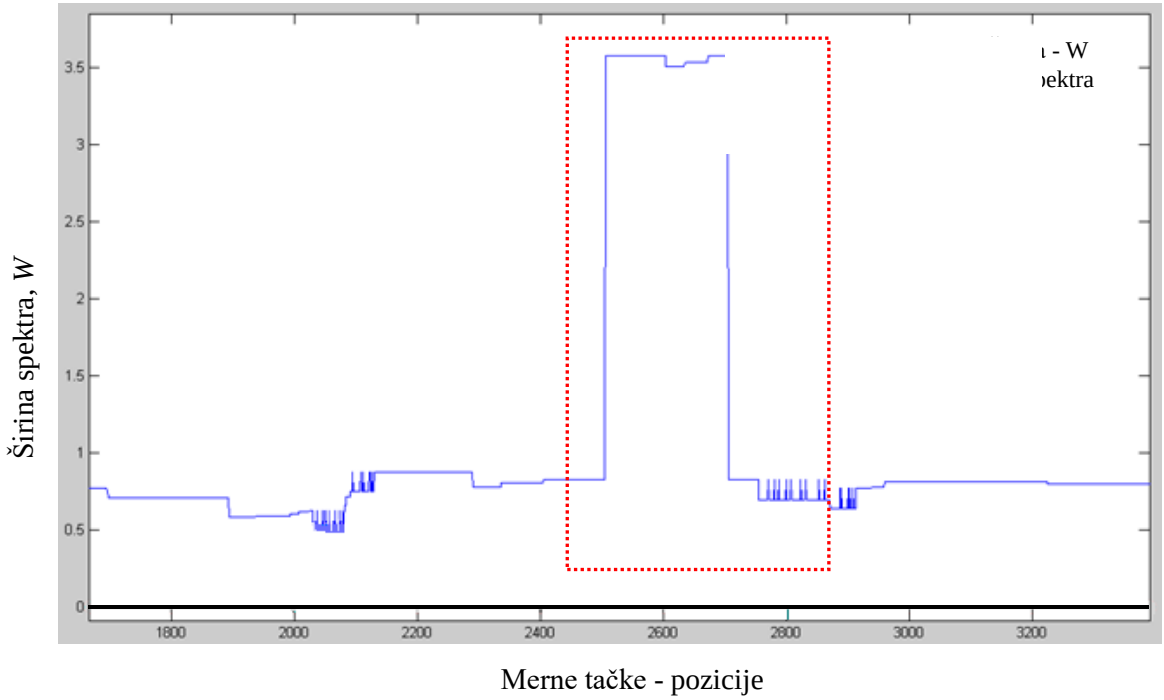


Slika 4.12. Površina (*A*) između krive spektra i odgovarajuće prave na unapred definisanoj vrednosti f(α)=0,2 duž posmatranog puta.



Slika 4.13. Trodimenzionalni prikaz sa klasterima tačaka za kombinaciju tri karakteristična parametra multifraktalnog spektra.

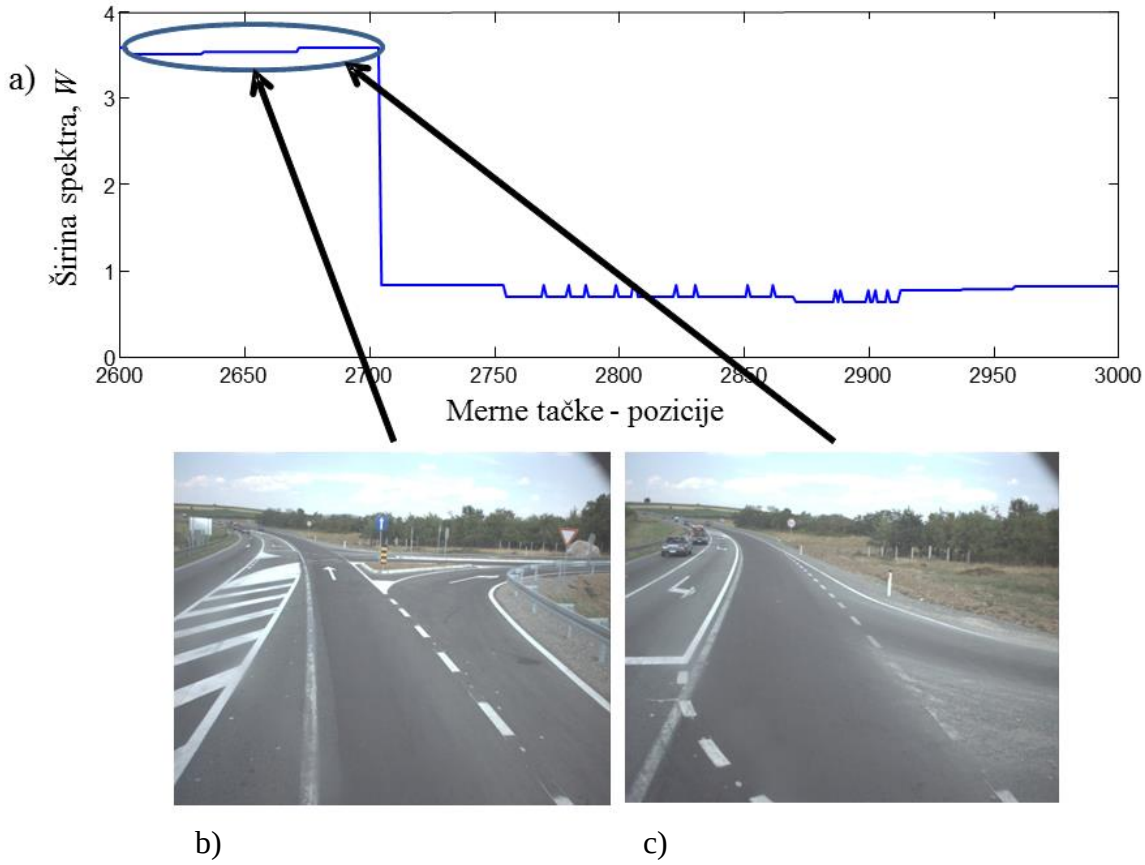
Vrednosti parametra širine spektra *W* duž celog puta prikazane su na slici 4.14. Posebno je razmatrana deonica u intervalu mernih pozicija [2600, 3000] na kojoj dolazi do značajnih promena vrednosti širine spektra, *W*.



Slika 4.14. Promena širine spektra - *W*, duž posmatranog puta.

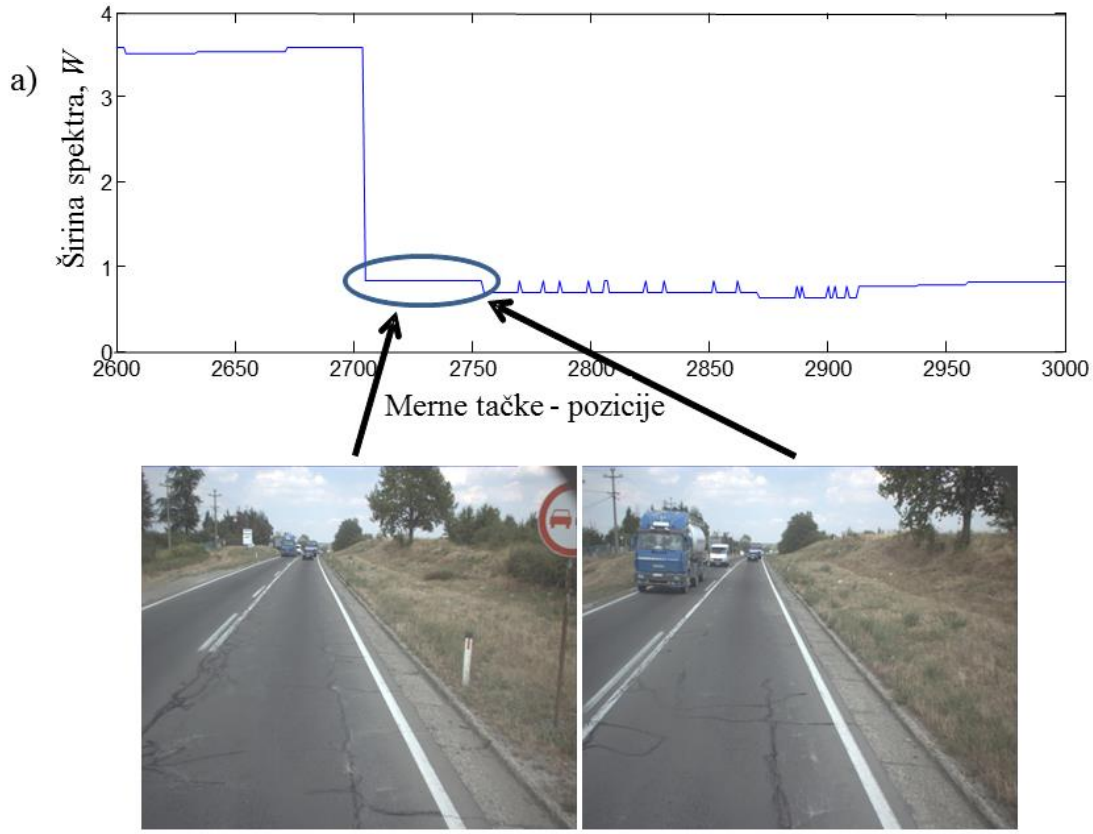
Lokalne karakteristike kvaliteta površinskog sloja puta potvrđene su video-snimcima sa razmatrane deonice (slike 4.15, 4.16 i 4.17).

Na slici 4.15. prikazan je slučaj nove putne površi u veoma očuvanom stranju. Visoke vrednosti parametra širine spektra *W* ukazuju na dobar kvalitet površi puta, što odgovara većoj dubini teksture.



Slika 4.15. a) Visoke vrednosti parametra širine spektra – *W*, ukazuju na bolji kvalitet površi puta b) i c).

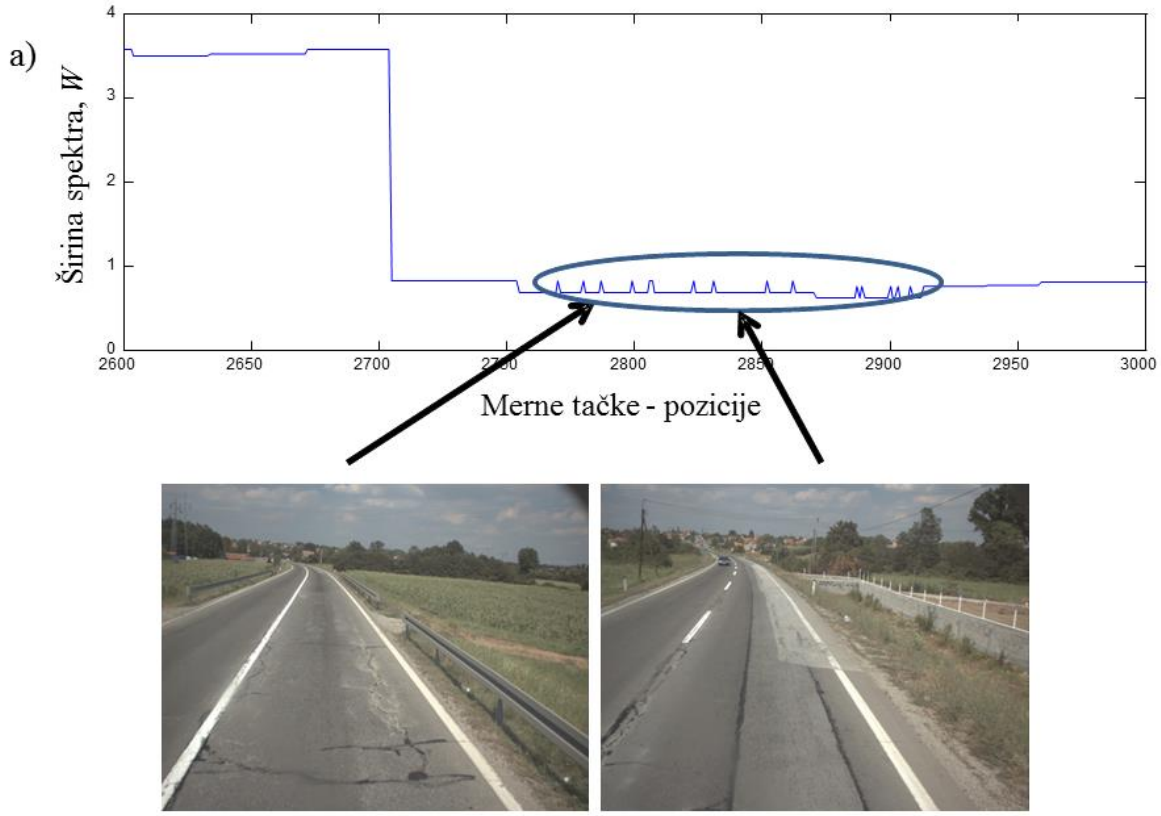
Stara površ puta, čiji je kvalitet vidljivo degradiran je prikazana na slici 4.16. Zakrpljena oštećenja se mogu detektovati i ona značajno utiču na oblik spektra. Postavljanjem zakrpa asfaltnog i bitumenskog sastava na površini, menja se dubina profila površi odnosno sama tekstura, pa se stoga smanjuje širina intervala vrednosti singulariteta. Vrednost parametra *W* je niža.



b) c)

Slika 4.16. a) Vrednosti parametra širine spektra *W*, koje ukazuju na staru, korišćenu površ puta b) i c).

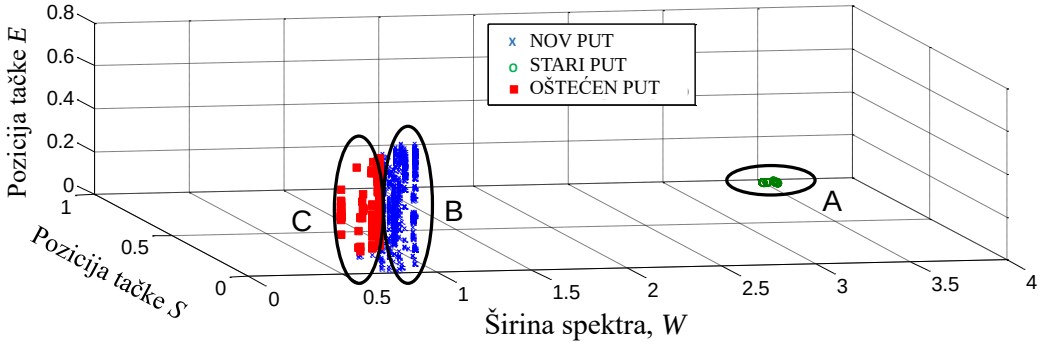
Značajno oštećena površ puta sa različitim reparacionim segmetima prikazana je na slici 4.17. Mogu se uočiti dva slučaja: levi video-frejm prikazuje oštećenu površ sa pukotinama, a desni površ sa dodatim slojevima asfalta. U oba slučaja pojavljuju se izraženi diskontinuiteti, što se može uočiti posle analize parametra *W*.



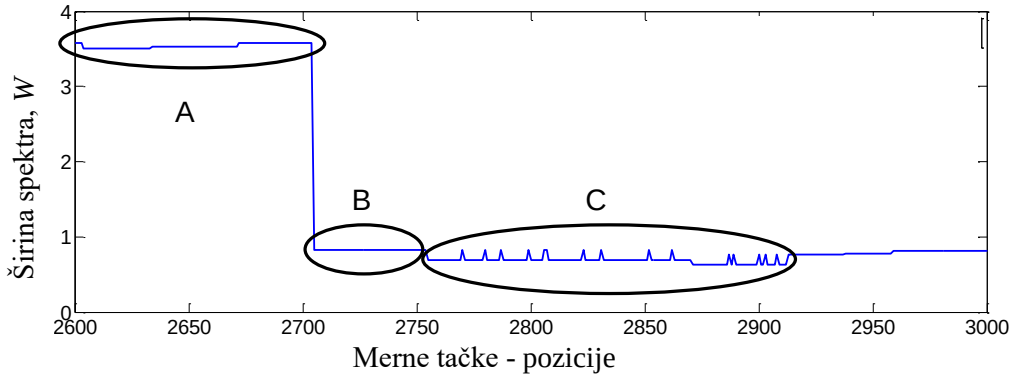
Slika 4.17. a) Niske vrednosti parametra širine spektra, *W* koje ukazuju na značajno oštećenu površ puta b), i put sa različitim segmentima reparacije c).

Na slici 4.18. prikazana je trodimenzionalna klasterizacija merenja kvaliteta površi puta, koristeći tri parametra za opis multifraktalnog spektra. Merne zone koje odgovaraju klasterima sa slike 4.18.a) su prikazane na slici 4.18.b). Na slici se vidi da je moguće razlikovati tri grupe tačaka koje ukazuju na različite kvalitete putne površi.

Merne tačke unutar klastera stare površi puta (B) su prilično homogeno grupisane. Klaster oštećene površine (C) sadrži tačke koje nisu homogeno grupisane i očigledno je da ne pripadaju grupi koja se odnosi na stare površi. Merne tačke koje odgovaraju novoj površi puta (A) značajno se razlikuju od druge dve grupe tačaka



a)



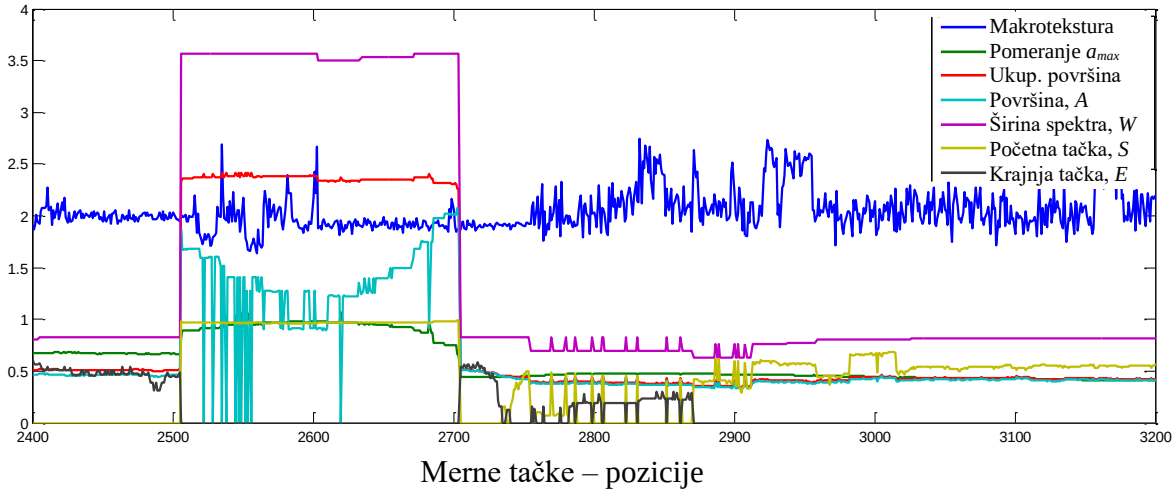
b)

Slika 4.18. Trodimenzionalna klasterizacija podataka prema kvalitetu putne površi, dobijena analizom triju parametara za opis multifraktalnog spektra.

Merne tačke unutar klastera stare površi puta (B) su prilično homogeno grupisane. Klaster oštećene površine (C) sadrži tačke koje nisu homogeno grupisane i očigledno je da ne pripadaju grupi koja se odnosi na stare površi. Merne tačke koje odgovaraju novoj površi puta (A) značajno se razlikuju od druge dve grupe tačaka

Na osnovu izvršene analize promena makroteksture multifraktalnim pristupom, moguće je izvršiti klasifikaciju putne površi.

Na slici 4.19. grafički su prikazane promene relevantnih karakterističnih parametara multifraktalnog spektra, na delu deonice sa mernom zonom od pozicije 2400 do 3200.



Slika 4.19. Promene relevantnih karakterističnih parametara multifraktalnog spektra, na delu deonice.

4.4 Klasifikacija površine puta bazirana na multifraktalnom pristupu velikih devijacija

U ovom odeljku, za multifraktalni pristup obradi signala, predstavljenih na slici 4.6, koristi se tzv. tehnika velikih devijacija (LD - *Large Deviation*) [137] za formiranje multifraktalnog spektra uzoraka signala. U ovoj analizi, svaki spektar je opisan karakterističnim parametrima koji su prikazani na slici 4.5.

Definicija multifraktalnih karakteristika koje opisuju spektar u ovom slučaju je data izrazima:

$$F_1 = mean\ (\alpha_D), \tag{4.6}$$

$$F_2 = std\ (\alpha_D), \tag{4.7}$$

$$F_3 = median\ (\alpha_D), \tag{4.8}$$

gde je $\alpha_D \in (\alpha_{min}, \alpha_{max})$.

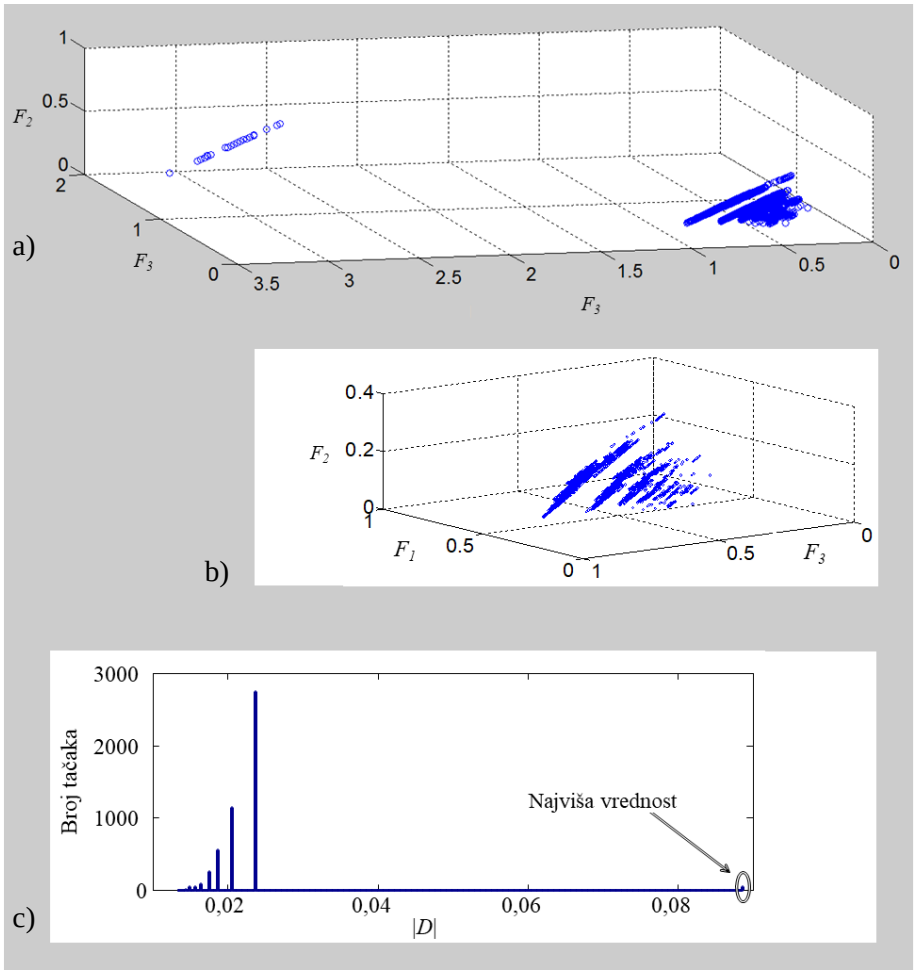
Definisana obeležja predstavljaju statističku distribuciju (α) vrednosti u opsegu [α_{min}, α_{max}]. Vrednosti α na desnoj strani multifraktalnog spektra odgovaraju intenzivnim promenama malih vrednosti singulariteta, a ta činjenica se upravo i koristi za karakterizaciju makroteksture.

4.4.1 *Metodologija klasifikacije makroteksture*

S obzirom da se merenja makroteksture obavljaju iz vozila duž putnog pravca, moguće je ceo skup izmerenih vrednosti posmatrati i kao vremensku seriju, koja sadrži 5000 merenja. Klizajući prozor u ovom slučaju je definisan dužinom od 50 mernih pozicija (tačaka). Vremenski nizovi su obrađeni klizajućim prozorom, pomeranjem od prve, pa do 4950. pozicije. *Large deviation* pristup je primenjen na svaku poziciju kliznog prozora, na osnovu merenja unutar njega. Tri karakteristična parametra su ekstrakovana iz LD multifraktalnog spektara.

Kao rezultat, dobijena su redom tri pripadajuća niza, [F_1], [F_2] i [F_3], od kojih svaki sadrži po 4950 tačaka. Kombinovanjem ovih triju nizova u 3D prikazu, mogu se uočiti klasteri tačaka u osam odvojenih ravni.

Jednačina ravni je izvedena izračunavanjem ortogonalnih vektora ravni. Vrše se dve faze usrednjavanja. Najpre se ortogonalni vektor izračunava usrednjavanjem broja tačaka koje pripadaju istoj ravni, a potom se usrednjavaju ortogonalni vektori koji pripadaju istoj grupi tačaka, ali u različitim ravnima (slika 4.20).



Slika 4.20. a) Trodimenzionalni prikaz klasterisanih tačaka za nizove [F_1], [F_2] i [F_3]; b) trodimenzionalni prikaz iz perspektive preseka ravni F_1-F_2 i F_2-F_3, c) diskretne vrednosti $|D|$ ukazuju na postojanje paralelnih ravni.

4.4.2 Diskusija

Sa ciljem ocene efikasnosti klasifikacije puteva na različitim nivoima geometrijskih karakteristika, upoređena su dva obeležja za klasifikaciju: makrotekstura i ravnost. Postojeća klasifikacija puteva zasniva se na ravnosti puta, koja je predstavljena parametrom IRI (*International Roughness Index*) [41].

Tabela 4.1. Predložena klasifikacija bazirana na graničnim vrednostima $|D|$.

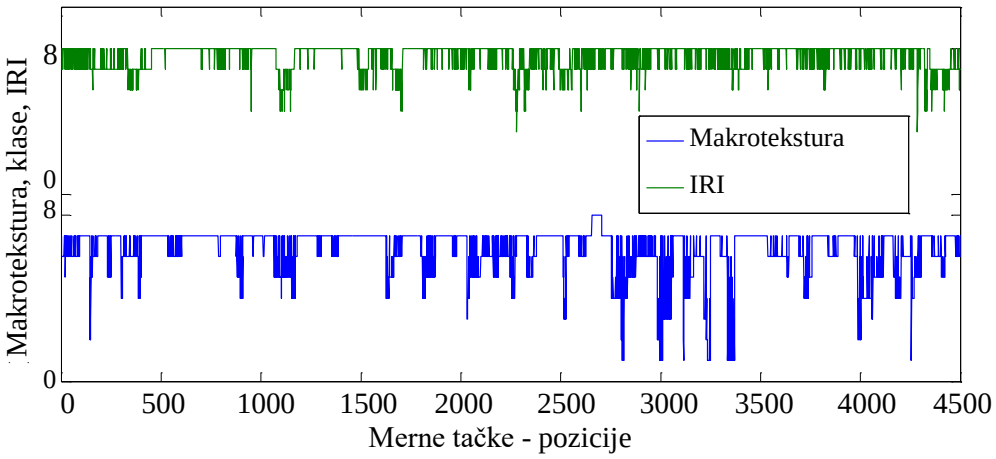
Klasa	**Vrednosti konstante *D***
Klasa 1	$|D| < 0{,}014$
Klasa 2	$0{,}014 \leq |D| < 0{,}015$
Klasa 3	$0{,}016 \leq |D| < 0{,}017$
Klasa 4	$0{,}017 \leq |D| < 0{,}018$
Klasa 5	$0.018 \leq |D| < 0.0196$
Klasa 6	$0.0196 \leq |D| < 0.022$
Klasa 7	$0.022 \leq |D| < 0.056$
Klasa 8	$0.056 \leq |D|$

Tabela 4.2. Postojeća IRI klasifikacija sa odgovarajućim vrednostima udobnosti vožnje i brzine vožnje [41].

IRI	**Udobnost vožnje (RC)**	**Brzina vožnje (prema DC)**
Klasa 1	RC > 14	Nedefinisana
Klasa 2	12 < RC ≤ 14	< 30km/h
Klasa 3	10 < RC ≤ 12	30-40 km/h
Klasa 4	8 < RC ≤ 10	40-50 km/h
Klasa 5	6 < RC ≤ 8	50-60 km/h
Klasa 6	4 < RC ≤ 6	70-90 km/h
Klasa 7	2 < RC ≤ 4	100-120 km/h
Klasa 8	0 < RC ≤ 2	>120 km/h

Ova klasifikacija se utvrđuje na osnovu udobnosti i brzine vožnje, s obzirom na geometrijske karakteristike putne površi, a prikazana je u tabeli 4.2. Za potrebe ovog istraživanja, oba parametra su analizirana nakon merenja obavljenih u isto vreme, na istoj deonici puta. Parametar ravnosti se meri standardizovanom procedurom [31, 139]. Na osnovu ranijih istraživanja utvrđena je klasifikacija kvaliteta puta prema parametru IRI. Prema tim klasama odredjuju se vrednosti brzine i odgovarajuće udobnosti tokom vožnje.

Oba rezultata, prikazana u tabelama 4.1. i 4.2, koja su zasnovana na IRI vrednosti i predloženoj metodologiji klasifikacije makroteksture, upoređena su za istu deonicu puta, a rezultat je prikazan na slici 4.21.



Slika 4.21. Rezultati komparativne analize makroteksture i IRI parametara, merenih u isto vreme, na istoj deonici puta.

Dodatna poređenja izvršena su merenjem korelacije raspodele klase u obe metode klasifikacije. Vrednost korelacije je 0,0447, što ukazuje na to da ove dve klasifikacije nisu korelisane. Sledeće poređenje se zasniva na utvrđivanju učešća visoke klase puta, jer je distribucija visoke klase objektivni indikator pogodan za poređenje. Za slučaj makroteksture, klase 7, 8 i za IRI, samo klasa 8, uzimaju se u obzir, jer klasa 8 predstavlja novu površ puta. U slučaju klasifikacije makroteksture, učešće visokih klasa je 56,87%, dok je u slučaju IRI ta vrednost jednaka 68,67%.

Procenat učešća visokih klasa u obe klasifikacije ukazuje na to da klasifikacija makroteksture daje bolju rezoluciju, a time i bolji pregled (uvid) u kvalitet putne površine od klasifikacije ravnosti. Tehnologije merenja ravnosti su različite i imaju sporije odzive od sistema merenja za makroteksturu, tako da ovakva klasifikacija nije precizna. Poslednje poređenje izvršeno je određivanjem lokacija koje su proglasile visoku klasu u obe klasifikacije. Ukupna količina takvih lokacija normirana je brojem lokacija koje objavljuju visoku klasu u IRI klasifikaciji. Dobijeni rezultat korelacije od 59,35% dokazuje da su, u slučaju visokih klasifikacija, obe klasifikacije podudarne. To ukazuje na relevantnost ovde predložene metodologije za klasifikaciju puteva.

5. Algoritam predviđanja rizika i mapiranje puta

5.1 Teorijski uvod

U dodatnoj interpretaciji, tekstura se može definisati kao ponovljeni uzorak informacija ili raspored strukture sa regularnim i/ili nepravilnim intervalima [140]. U opštem smislu, tekstura kvalifikuje putnu površ kroz direktnu procenu veličine, oblika, gustine, raspodele i odnosa njenih elementarnih činilaca [141].

Tekstura određene površi se može analizirati i indirektno, obradom slike koja je dobijena snimanjem te površi ili nekog njenog dela. Ekstrakcija obeležja teksture, primenjena na slike, predstavlja važan korak u različitim aplikacijama za obradu slike, na primer daljinskim detekcijama i dijagnostici; biomedicinskom snimanju; za klasifikaciju i pretraživanje snimljenog sadržaja; za testiranje industrijskog kvaliteta i kontrole proizvodnje [122]. Različite tehnike obrade slike mogu se koristiti za karakterizaciju i klasifikaciju njene teksture. Brojne metode se koriste za ekstrakciju obeležja teksture slike, uključujući one zasnovane na transformacijama, statistici, strukturi ili modelu. Ove metode se često koriste u istraživačkom radu za tehnike prepoznavanja uzoraka (*pattern recognition*), pretraživanje slika i njihovu klasifikaciju [142].

Razmatrajući pitanja razvoja koncepcije bezbednosti na putevima (*road safety*), slika putne površi se koristi kao ulazni podatak za ukupnu ocenu i klasifikaciju stanja kolovoza. Tekstura površine puta se razlikuje u zavisnosti od asfaltnih i/ili betonskih kompozita, koji formiraju površinski sloj puta; zatim, zavisi od gustine saobraćaja; starosti površine puta; atmosferskih uslova, interakcije sa pneumaticima i sl. Opis putne površi i njena evaluacija važni su elementi za predikciju i procenu vrednosti drugih relevantnih parametara sigurnosti [53, 54].

Osim dijagnostike snimanjem slika u koncepciji kompjuterskog ili mašinskog vida, za procenu stanja na putevima se koriste i druge relevantne tehnike ispitivanja, npr. merenje temperature vazduha i površine; GPS lociranje i procena brzine; merenje vibracija i buke; vlažnosti; luminiscencije, itd. [143-145].

Postupci ocene stanja puta, kao što je već pomenuto, obično se baziraju na vizuelnoj inspekciji, od strane posmatrača (operatera) koji pregledaju snimljene podatke. Prepoznate promene se arhiviraju. Operateri beleže njihove GPS pozicije. Ovakva subjektivna percepcija, obično se u tom slučaju koristi za klasifikaciju pojedinih segmenata puta. Ovo je neprecizan i dugotrajan postupak, koji u velikoj meri zavisi od ličnih sposobnosti posmatrača [7, 8]. Stoga je razvoj automatizovanih metoda inspekcije puta od velike važnosti. One su značajne za bržu i precizniju klasifikaciju ukupnog procesa procene stanja puta, predikcije rizika i mapiranja puta.

U ovom poglavlju prikazan je algoritam za predviđanje rizika na putu, koji se odnosi na opasnost od proklizavanja. Zasnovan je na minutnoj klasifikaciji teksture površine puta uz pomoć mobilnog sistema za skeniranje koji prikuplja slike kamerom postavljenom na vozilo. Predmet merenja takođe je bila i temperatura putne površi.

Jedna od glavnih prednosti predloženog algoritma ogleda se u tome što se može razviti u uslovima kada postoje poremećaji uzrokovani kretanjem vozila koje nosi kameru.

Ovi poremećaji mogu biti posledica brzine kretanja vozila u odnosu na putnu površ, vibracija koje se prenose na vozilo, promenljivog površinskog osvetljenja (senke) tokom vožnje, i dr.

Iz tog razloga, ovaj postupak dijagnostike, u poređenju sa dosadasnjim, svakako je u prednosti i u smislu mogućnosti detekcije finih promena u površinskoj strukturi.

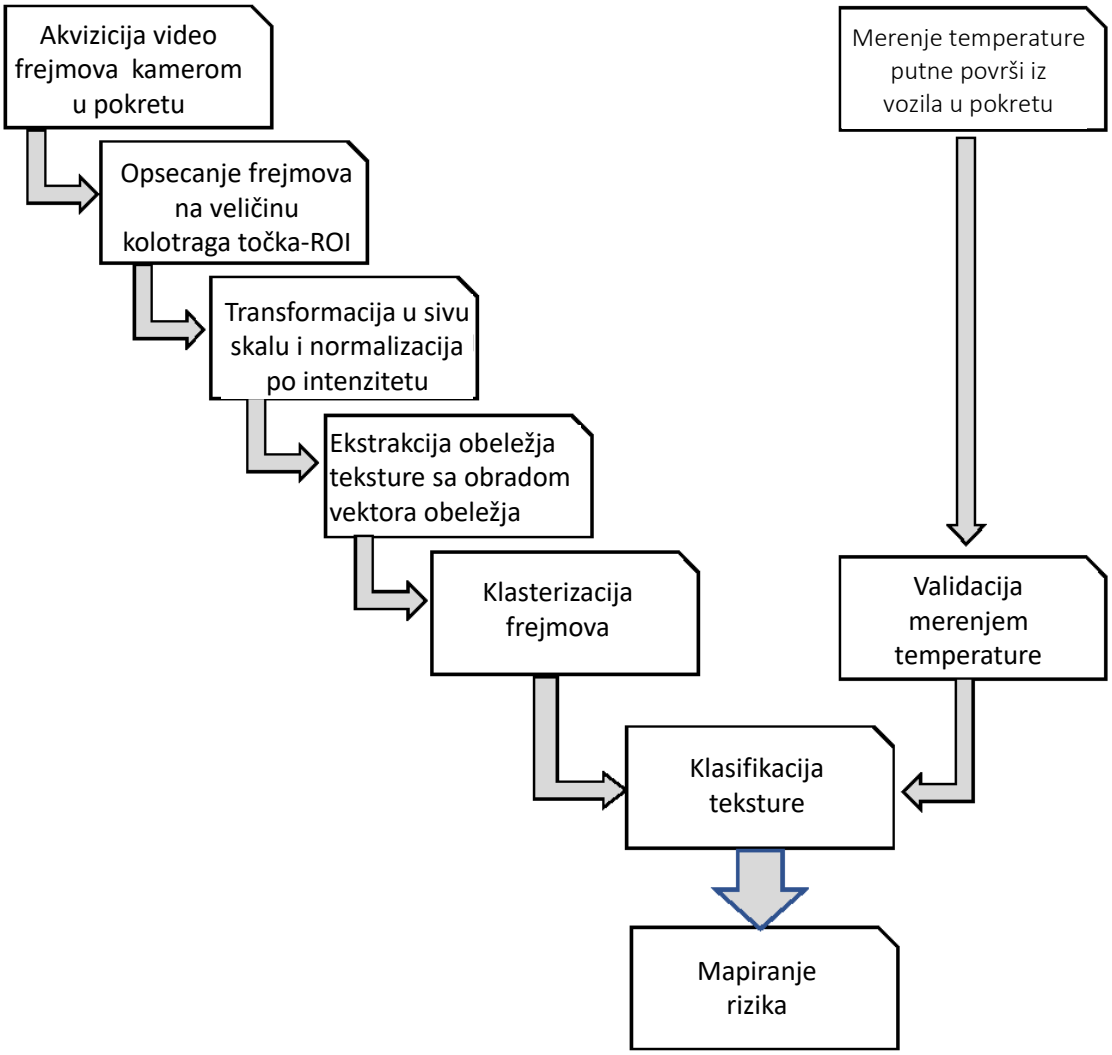
Kamera upotrebljena u eksperimentalnoj postavci ove disertacije, montirana je na vozilo, monofokalna je, tip M26 proizvođača "Mobotix", i prikazana je na slici 5.1. To je kamera visokih performansi po ključnim parametrrima sa 6MP kolor ili crno-belim senzorom. Širokopojasno vidno polje varira od 180° "riblje oko" do 8°, sa super teleobjektivom. Fleksibilna Mx6 sistemska platforma omogućava simultani prenos tri video-kodeka (MxPEG, MJPEG i H.264). Autofokus je automatski ili manualan, sa brzinom od 8 do 20 frejmova u sekundi.

Video-sekvence snimane su pri dnevnoj svetlosti i uz konstantnu brzinu vozila. Video- frejmovi su isečeni iz video-snimka. Nakon toga, regioni od interesa su izrezani iz svakog frejma. Ove oblasti (regioni) se obrađuju metodama za ekstrakciju obeležja teksture. Izlazni vektori obeležja se upoređuju sa različitim merama sličnosti, koje su razmotrene u ovom poglavlju. Površina teksture puta je identifikovana u nekoliko klasa obradom i kombinovanjem mernih rezultata. Merenja temperature površine obavljena iz istog vozila, ovde imaju ulogu validatora klasa teksture, npr. za utvrđivanje pogrešne klasifikacije u situacijama kada tekstura slike ne predstavlja stvarnu teksturu površi.

Slika 5.1. Kamera na krovu vozila za snimanje puteva Centra za motorna vozila, AMS Srbije.

5.2 Metodologija

Metodologija istraživanja u ovoj sprovedena je prema koracima i fazama koje su date na slici 5.2.



Slika 5.2. Dijagram toka realizacije algoritma

5.3 Eksperimentalna postavka

Radi eksperimentalne analize, vozilo za akviziciju podataka, se kretalo duž deonice magistralnog puta brzinom od 60 km/h. Kamera je bila postavljena imeđu branika i krova vozila, na visini od 80 cm od tla. Kamera inače može biti postavljena na prednjem, zadnjem ili, u slučaju više kamera, na oba kraja vozila. U našem eksperimentu je bila postavljena na zadnjem delu vozila. Vidno polje kamere je zahvatalo punu širinu kolovoza, sa obe kolovozne trake, ali je fokus bio na površi puta koja zahvata levi kolotrag u saobraćajnoj traci kojom se vozilo kreće. Levi kolotrag predstavlja segment površine puta, ili trasu po kojoj se kreće prednji ili zadnji levi točak, u smeru kretanja vozila. Inače, i najveće promene u kvalitetu i stepenu degradacije površi dešavaju se upravo na trasi kretanja točkova, a ne u području između njih. Kamera je u ovom slučaju bila usmerena verikalno ka tlu, kako bi se pod pravim uglom izvršila akvizicija video signala sa površi puta (Slika 5.3.a).

a) b)

Slika 5.3. Akvizicija podataka: a) Položaj kamere usmerene na površinu puta; b) Senzor temperature na prednjem braniku vozila.

Podaci o temperaturi putne površi analizirani su sa ciljem unapređenja algoritma u smislu adekvatne klasifikacije teksture puta obradom teksture slike. Ovo je učinjeno postavljanjem temperaturnog senzora ispod prednjeg branika vozila (slika 5.3.b), tako da se podaci o površinskoj temperaturi mogu prikupiti istovremeno u toku snimanja video-sekvenci sa površi puta. Izmerene vrednosti temperature usrednjavane su na razdaljinama od 50 m, što je uobičajena procedura u protokolima za ocenu stanja puta [7, 8].

Svaki zaseban video-frejm je referenciran GPS koordinatama. Svaki zapis o prosečnoj temperaturi je takođe bio povezan sa GPS koordinatama. Ovo je omogućilo informaciju o preciznoj poziciji svakog snimljenog frejma, kao i pozicijama na kojima je merena temperatura putne površi. Stoga postoji korelacija između prostorne raspodele frejmova i merene temperature duž cele deonice puta.

5.4 Karakterizacija teksture

Jedan od najjednostavnijih pristupa za opisivanje teksture slike je upotreba statističkih momenata histograma intenziteta slike ili regije [146]. Svaki video-frejm je isečen prema regionu od interesa (ROI) i prikazan u skali nivoa sivih nijansi. Za svaki od ROI iz frejmova izračunat je i prikazan histogram intenziteta sive. S obzirom na to da tekstura slike u ovom istraživanju odgovara stvarnoj teksturi koja potiče od određene granulacije površinskog sloja puta, analiza slike putem histograma ne daje adekvatnu informaciju o prostornoj raspodeli elemenata teksture. Razlog tome je što će upotreba samog histograma u proračunu rezultirati parametrima teksture koji sadrže samo informacije o raspodeli intenziteta, ali ne i o relativnom položaju piksela, jednog u odnosu na drugi, u okviru date teksture. Stoga je nemoguće detektovati relativan položaj i raspodelu realnih agregata koji utiču na konačnu klasifikaciju i kategorizaciju putne površi. Neki od karakterističnih uzoraka frejmova, u ovom slučaju, i odgovarajući histogrami intenziteta sive nijanse, dati su u tabeli 5.1.

5.4.1 Ekstrakcija obeležja teksture

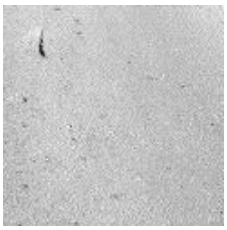
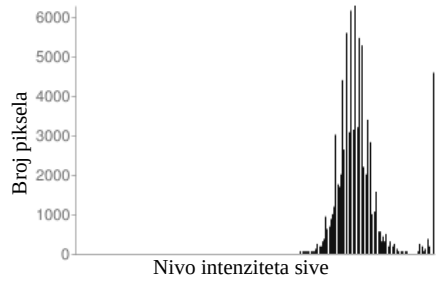
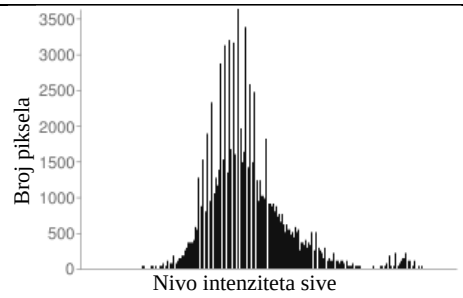
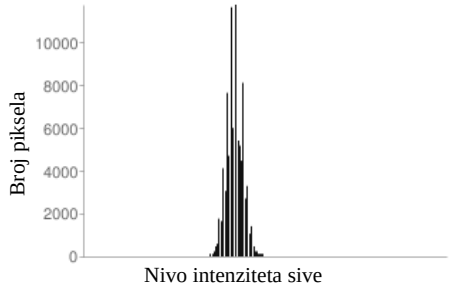
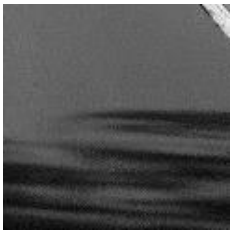
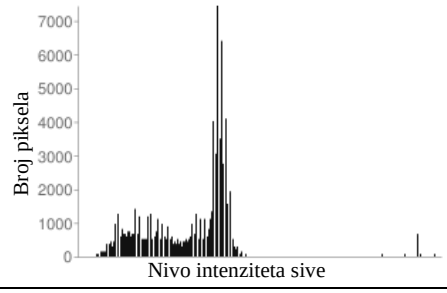
U ovom istraživanju, za analizu teksture slike, korišćeni su Gaborova i WLT transformacija, bazirane na funkcijama kratkog talasa - talasića, te matrica kopojavljivanja nivoa sivog (GLCM), i histogram ivica (EHD) kao statistički bazirane metode ekstrakcije obeležja. Ovi alati, svaki prema svom pristupu u obradi signala, omogućili su izdvajanje vektora obeležja. To su vektori koji se odnose na opis regiona od interesa iz snimljenih frejmova. Na osnovu statističke analize ovih vektora, vršena je klasifikacija teksture slike, a potom i klasifikacija same površi kolovoza.

5.4.1.1 Gaborova transformacija

Gaborovi filtri ili Gaborove transformacije, bazirani na tzv. talasnoj funkciji, uspešno se koriste za segmentaciju teksture/klasifikaciju [147-149], detekciju ciljeva, prepoznavanje simbola [150, 151], prepoznavanje otiska prsta [152, 153], prepoznavanje lica [154, 155], analizu fraktalnih dimenzija, analizu dokumenata, detekciju ivica i graničnih površina objekta [156], analizu i kompresiju slika [157]. Gaborovi filtri zauzimaju značajno mesto u analizi slike, jer poseduju optimalna svojstva lokalizacije podjednako efikasno i u prostornom i u frekvencijskom domenu [147]. Izborom ključnih parametara, Gaborovi filtri se dizajniraju za potrebe obrade određenih tipova signala, a time se i smanjuje vreme računanja izlaznih promenljivih koje se dalje upotrebljavaju u različitim aplikacijama od interesa za adekvatnu i kvalitetnu analizu. U obradi teksture neki autori dizajniraju jedan Gaborov filtar za segmentiranje slika u okviru kojih se javljaju dve različite teksture [158, 159].

Gaborova funkcija se može opisati kao diskriminator teksture slike i osetljiva je na različite frekvencije i informacije o skali. Ove sposobnosti su bile interesantne za istraživanje u ovoj disertaciji. Gaborova transformacija je procedura koja koristi specifične filtre (funkcije) koji se primenjuju na slike na sličan način kao i konvencionalni filtri

Tabela 5.1. Frejmovi isečeni na veličine ROI i normalizovani u sivoj skali (leva kolona), sa odgovarajućim histogramima (desna kolona).

Uzorci – frejmovi ROI	Histogram intenziteta sive
	
	
	
	

Gaborov filtar može se posmatrati kao sinusoidalna ravan određene frekvencije i orijentacije, modulirana Gausovim (*Gauss*) omotačem. Dvodimenzionalna Gaborova funkcija $g(x, y)$ i njena Furijeova (*Fourier*) transformacija $G(u,v)$ opisane su izrazima (5.1) i (5.2), respektivno [160]:

$$g(x,y) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\right) exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) + 2\pi jWx\right], \tag{5.1}$$

gde je $j=\sqrt{-1}$, a W je frekvencija modulirane sinusoide.

$$G(u,v) = exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u-W)^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right]\right\}, \tag{5.2}$$

gde su: $\sigma_u = {}^{1}/_{2\pi\sigma_x}$ i $\sigma_{v=}\ {}^{1}/_{2\pi\sigma_y}$.

Gaborove funkcije formiraju kompletan neortogonalan osnovni set koji predstavlja polaznu osnovu za analizu teksture slike. Ekspanzija signala upotrebom osnovnog seta omogućava lokalno opisivanje određenog segmenta, a dalje se razmatra tzv. klasa samosličnih funkcija, koja se odnosi na Gaborovu transformaciju talasićima. Ako se pretpostavi da je $g(x, y)$matični talas, tada se Gaborova funkcija formira na sledeći način (samosličan filtar može se dobiti različitim transformacijama, tj. dilatacijama i rotacijama $g(x, y)$ kroz generišuću funkciju):

$$g_{mn}(x, y) = a^{-m} G(x^{`}, y^{`}), \tag{5.3}$$

gde je $a>1$; m, n=integer,

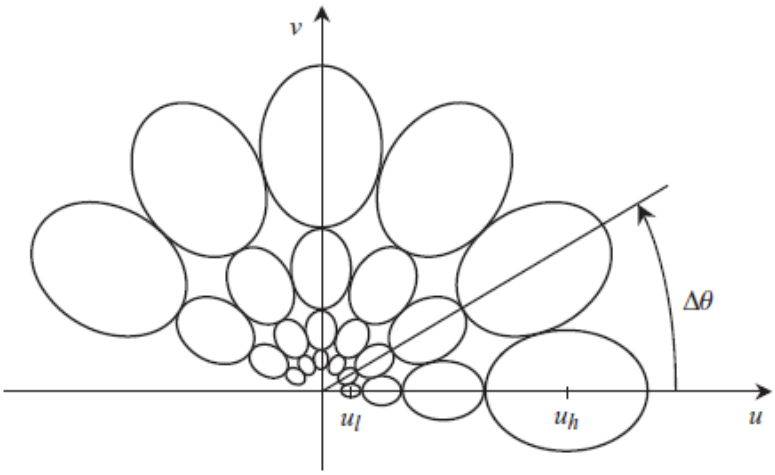
$$x^{`} = a^{-m}(x \cos\theta + y \sin\theta), \tag{5.4}$$

$$y^{`} = a^{-m}(-x \sin\theta + y \cos\theta), \tag{5.5}$$

gde je $\theta = {}^{2\pi}/_{K}$, a K je ukupni broj orijentacija; a^{-m} predstavlja faktor skaliranja sa pretpostavkom da lokalna energija ne zavisi od parametra m.

Osobina neortogonalnosti Gaborovih talasića ukazuje na postojanje redundantne informacije u filtriranim slikama ili frejmovima, pa se ta redudantnost mora umanjiti.

Ako pretpostavimo da promenljive U_l, i U_h, respektivno, predstavljaju niži i viši centar frekvencije od interesa, a K, kao što je već napomenuto, broj orijentacija, onda se može uvesti i S kao broj skala u dekompoziciji slike ili sličnog 2D signala. Ovde je S korisnički definisani broj nivoa skaliranja u dekompoziciji piramidalne slike sa više mogućih rezolucija. U ovakvom pristupu grafička podrška postavke na polovini maksimuma (HPM- *half peak magnitude)* za filtriranje u frekvencijskom domenu je data na slici 5.4. [160].



Slika 5.4. Gaborov filtar, konture indiciraju pristup HPM (*half peak magnitude)* za filtriranje u frekvencijskom domenu. Korišćeni parametri filtera su U_h = 0,4; U_l = 0,05; K = 6 i S = 4.

Ovo rezultira sledećim formulama za izračunavanje parametara filtra σ_u, i σ_v , koji omogućava da se izračunaju vrednosti σ_x i σ_y :

$$a = \left({U_h}/{U_l}\right)^{-\frac{1}{S-1}}, \tag{5.6}$$

$$\sigma_u = \frac{(a-1)U_h}{(a+1)\sqrt{2ln2}}, \tag{5.7}$$

$$\sigma_v = \mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{2k}\right)\left[U_h - 2\ln\left(\frac{\sigma_u^2}{U_h}\right)\right]\left[2\ln 2 - \frac{2\ln 2^2\sigma_u^2}{U_h^2}\right]^{-\frac{1}{2}}, \tag{5.8}$$

gde je W=$a^{-m}U_l$, i m=0,1,2…, S-1. Eliminišući osetljivost filtra na apsolutne vrednosti intenziteta, stvarne komponente 2D Gaborovog filtra su dobijene dodavanjem konstante, da bi njihova srednja vrednost bila jednaka nuli (to je moguće postići i ako se u jednačini (5.2) član G(0, 0) podesi na nultu vrednost).

Sa druge strane neka je slika predstavljena rasporedom elemenata sa $I(x, y)$. Tada je njegova Gaborova talasna transformacija za prikazivanje obeležja data izrazom:

$$W_{mn}(x,y) = \int I\,(x_1,y_1)\; g^*_{mn}\big((x-x_1),(y-y_1)\big)dx_1dy_1. \tag{5.9}$$

Operator * označava kompleksni konjugat, a x_1, y_1 su parametri kernela konvolucije. U ovom slučaju pretpostavili smo da su lokalne regije teksture prostorno homogene, jer tekstura površine puta ima generalnu tendenciju homogenosti. Pomeranjem jezgra konvolucije, klizanjem prozora preko slike, piksel po piksel, sprovodi se konvolucija, koja proizvodi filtriranu sliku sa novim rezultatom intenziteta nivoa piksela, kao novu izlaznu promenljivu. Srednja vrednost μ_{mn} i standardna devijacija σ_{mn} magnitude koeficijenata transformacije se koriste za predstavljanje regiona od interesa za određivanje klasifikacije teksture:

$$\mu_{mn} = \int\int |W_{mn}(x,y)|\, dxdy \tag{5.10}$$

i

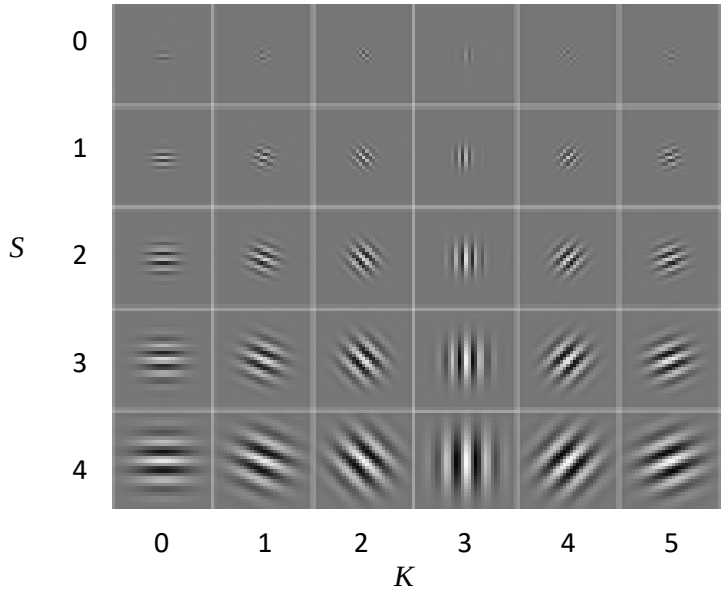
$$\sigma_{mn} = \sqrt{\int\int(\,|W_{mn}(x,y)| - \mu_{mn})^2\, dxdy} \tag{5.11}$$

Vektor obeležja se može ekstrakovati korišćenjem srednje vrednosti μ_{mn} i standardne devijacije σ_{mn} kao glavnih komponenata obeležja. U ovoj disertaciji, Gaborova transformacija je bila zasnovana na skaliranju na pet nivoa, S={0, 1, 2, 3, 4}i šest orijentacija, K={0, 1, 2, 3, 4, 5}, koje se odnose na uglove od 0°, 30°, 60°, 90°, 120° i 150° respektivno, što ukupno kreira banku od 30 filtra, kao što je pokazano na slici 5.5. Uz to, treba napomenuti da se primenjuje kernel konvolucije veličine 21x21 piksela.

Kada se uzmu u obzir svi parametri filtriranja, vektor obeležja se opisuje pomoću sledećeg izraza:

$$X = \left[\mu_{0_0}, \sigma_{0_0}\,, \mu_{0_1,}\sigma_{0_1}, \dots \mu_{s_k}\sigma_{s_k}, \dots\; \mu_{4_5}\sigma_{4_5}\,\right]. \tag{5.12}$$

Konačna dimenzija vektora obeležja se određuje na osnovu 5 nivoa skaliranja (S), 6 orijentacija (K), i 2 komponente obeležja (μ_{mn}, σ_{mn}), što čini 5 · 6 · 2 = 60 koordinata.



Slika 5.5. Prikaz nivoa skaliranja *S* i orijentacija *K* korišćenog Gaborovog filtra.

5.4.1.2 Matrica zajedničkih pojavljivanja nivoa sivog

Matrica zajedničkih pojavljivanja nivoa sivog (*gray level co-occurrence matrix*, GLCM) se u literaturi uspešno koristi za ekstrakciju karakteristika slike, čijom analizom se veoma približno može realizovati klasifikacija teksture realnog objekta sa koga je početna slika i dobijena [122].

Upotreba statističkog pristupa, kao i deskriptora strukturalne prirode poput matrice zajedničkih pojavljivanja nivoa sivog, omogućava da se pribave vredne informacije o relativnom položaju susednih piksela na slici.

Za zadatu sliku *I*, veličine $N \times N$, GLCM, matrica **P** se može definisati kao

$$P(i,j) = \sum_{x=1}^{N} \sum_{y=1}^{N} \begin{cases} 1, & \text{ako je } I(x,y) = i \text{ uz } I(x+\Delta_x, y+\Delta_y) = j \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{cases}. \quad (5.13)$$

Ovde ofset (Δx, Δy) određuje udaljenost između piksela od interesa i njegovog suseda. Parametrizacija ofseta (Δx, Δy) čini GLCM osetljivom na rotaciju. Rotaciona invarijantnost se može izbeći formiranjem GLCM pomoću skupa u kome svaki ofset na istom parametru rastojanja Δ zahvata uglove od 0 do 180 stepeni. Dovoljan stepen rotacione invarijantnosti postignut je sa [0 Δ] za 0°: $\mathbf{P}_H$ - horizontalno, [-Δ, Δ] za 45°: $\mathbf{P}_{DD}$ - desno dijagonalno, [-Δ 0] za 90°: $\mathbf{P}_V$ - vertikalno, i [-Δ $-\Delta$] za 135°: $\mathbf{P}_{LD}$ - levo dijagonalno [146].

Slika 5.6. ilustruje detalje procesa za generisanje četiri GLCM koristeći *Ng* =5 nivoa za ofsete {[0 1], [-1 1], [-1 0], [-1 -1]} koji su definisani kao po jedan susedni piksel u četiri moguća smera.

Može se videti da se dva susedna piksela (2, 1) ulazne slike odražavaju u matrici usklađenosti $\mathbf{P}_H$ kao 3, jer u ulaznoj slici postoje tri pojave vrednosti intenziteta piksela 2 i vrednosti intenziteta piksela 1, susednih piksela.

Susedni pikseli (1, 2) će se pojaviti tri puta u $\mathbf{P}_H$, što ove matrice čini simetričnim. Na isti način se izračunavaju i ostale tri matrice $\mathbf{P}_V$, $\mathbf{P}_{LD}$, $\mathbf{P}_{DD}$ [146].

Četiri matrice su posebno korišćene za klasifikaciju, a konačna odluka formira se fuzijom pripadajućih odluka. S obzirom na to da su ove matrice simetrične, pri oblikovanju vektora je pogodnije koristiti gornje ili donje dijagonalne koeficijente matrice. Dakle, umesto da ima vektorsku dužinu $Ng \times Ng$, veličina vektora se smanjuje na $(Ng \times Ng + Ng)/2$, što pomaže da se ubrza proces, bez uticaja na preciznost u klasifikaciji teksture.

U ovoj disertaciji angažovan je radijalni GLCM za ekstrakciju obeležja [161]. Različiti tipovi obeležja su izdvojeni iz 256 frejmova u sivim tonovima: entropija, energija, kontrast, korelacija i lokalna homogenost (*Inverse Difference Moment* - IDM). U ovom slučaju, upotrebljena je analiza sa 24 pravca izabranih iz referentnog piksela, pri čemu svaka orijentacija predstavlja i različitu udaljenost piksela.

Formirane su 24 GLCM iz kojih su ekstrapolirana ranije navedena obeležja. To znači da je rezultujući vektor obeležja ekstrakovan iz 24 GLC matrice, uključujući četiri tipa obeležja. Vektor obeležja u ovom slučaju ima 24 · 4 = 96 koordinata.

Polazna slika intenziteta

	0	1	2	3
0	0	3	4	2
1	2	1	3	4
2	0	3	2	1
3	2	1	0	3

Matrica

0	0	1	0	3	0
1	1	0	3	1	0
2	0	3	0	1	1
3	3	1	1	0	2
4	0	0	1	2	0

$\mathbf{P}_H(0^o)$

0	0	0	4	0	0
1	0	0	0	4	1
2	4	0	0	1	1
3	0	4	1	0	1
4	0	1	1	1	0

$\mathbf{P}_V(90^o)$

	0	1	2	3	4
0	0	2	0	0	0
1	2	0	1	0	1
2	0	1	0	2	1
3	0	0	2	2	0
4	0	1	1	0	0

$\mathbf{P}_{DD}(45^o)$

	0	1	2	3	4
0	0	2	0	1	0
1	2	0	1	1	0
2	1	1	0	2	0
0	1	1	2	1	0
4	0	0	0	0	2

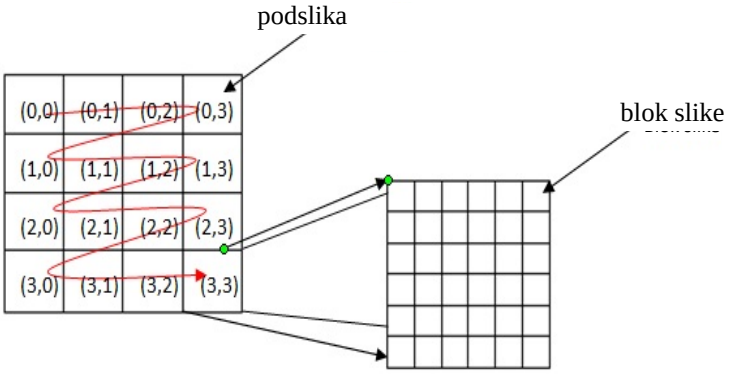
$\mathbf{P}_{LD}(135^o)$

Slika 5.6. Generisanje GLCM za Ng=5 nivoa i za 4 različita ofseta: $\mathbf{P}_H$ (0°), $\mathbf{P}_V$ (90°), $\mathbf{P}_{RD}$ (45°), i $\mathbf{P}_{LD}$ (135°).

5.4.1.3 Histogram prepoznavanja ivice objekata

Ivični histogram ili *Edge histogram descriptor (EHD)* jedan je od široko rasprostranjenih metoda za detekciju različitih oblika u slici. U osnovi predstavlja relativnu učestalost pojave pet vrsta ivica u svakom lokalnom području koje se naziva podslika ili blok slike. Za *Edge histogram*, nehomogeni deskriptor teksture invarijantan na skalu, primenjeno je pet filtara [125]. Identifikovana je prostorna distribucija pet tipova ivica u pet pravaca: vertikalni; horizontalni; nagib od 45°; nagib od 135°; i neusmeren. Ekstrakcija obeležja se zasnivala na podeli slike na 16 (4·4) blokova, a zatim na primeni pet filtra na svaki region u pet opisanih pravaca. Generisan je 5-bin histogram za svaki blok. Podslika je definisana podelom prostora slike u 16 nepreklapajućih blokova, kao što je prikazano na slici 5.7. [162].

Dakle, jedna particija slike stvara 16 blokova jednake veličine bez obzira na veličinu originalne slike. Za definisanje karakteristika bloka slike, potrebno je generisati histogram raspodele ivica za svaki blok. Rubovi bloka slike kategorisani su u 5 tipova: vertikalni, horizontalni, pod nagibom od 45 stepeni, pod nagibom od 135 stepeni i neusmerne ivice ili rubovi, kao što je prikazano na slici 5.8. Histogram za svaki blok slike predstavlja relativnu distribuciju pet vrsta ivica u odgovarajućoj podslici.



Slika 5.7. Definisanje podslika i blok-slike u EHD.

a) vertikalna ivica | b) horizontalna ivica | c) ivica pod nagibom od 45° | d) ivica pod nagibom od 135° | e) ivica neodređenog pravca

Slika 5.8. Pet tipova orijentacija u ivičnom histogramu.

Jednostavna metoda za izdvajanje ivičnog histograma u bloku slike zasnovana je na primeni digitalnih filtara u prostornom domenu. Stoga je prvo potrebno podeliti blok slika na četiri podbloka, kao što je prikazano na slici 5.9. Potom se numerišu oznake četiri podbloka. Prosečni nivoi sive za četiri podbloka predstavljeni su na (i, j) bloku slike kao $a_1(i, j)$, $a_2(i, j)$, i $a_3(i, j)$, $a_4(i, j)$. Takođe, koeficijenti filtra za ivice pravaca vertikalne, horizontalne, pod uglom od 45 stepeni, pod uglom od 135 stepeni i neusmerene ivice, mogu se predstaviti kao $f_v(k)$, $f_h(k)$, $f_{d45}(k)$, $f_{d135}(k)$ i $f_{nd}(k)$, respektivno, gde $k = 0, ..., 3$ predstavlja lokaciju podblokova.

Slično tome, mogu se predstaviti koeficijenti filtara za ostale ivične filtre, kao što je prikazano na slici 5.9.

1	-1
1	-1

a) filtar vertikalne ivice

1	1
-1	-1

b) filtar horizont. ivice

$\sqrt{2}$	0
0	$-\sqrt{2}$

c) filtar ivice pod nagibom od 45°

0	$\sqrt{2}$
$\sqrt{-2}$	0

d) filtar ivice pod nagibom od 135°

2	-2
-2	2

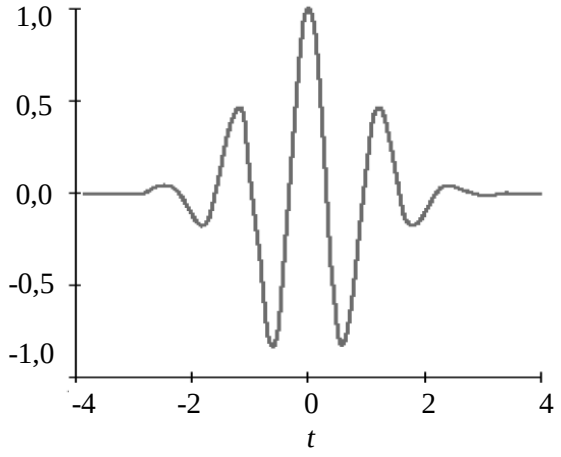
e) filtar neusmerene ivice

Slika 5.9. Filtri za detekciju položaja i pozicije ivica objekta.

EHD je formulisan međusobnim povezivanjem rezultata pojedinačnih EHD. Odgovarajući ekstrahovani vektor obeležja ima $16 \cdot 5 = 80$ koordinata.

5.4.1.4 Ekstrakcija obeležja talasićima

Transformacija talasićima (*Wavelet Transform* –WLT) je posebna vrsta funkcije koja za kratko vreme pokazuje oscilatorno ponašanje i potom brzo prigušenje. U obradi signala pomoću Furijeove transformacije, signal se dekomponuje u niz sinusnih ili kosinusnih funkcija. Nemoguće je istovremeno znati tačnu frekvenciju i tačno vreme pojave te frekvencije u signalu. Da bi se znala frekvencija, signal se mora širiti u vremenu, ili obrnuto. Rešenje je podeliti signal na komponente koje nisu sinusni ili kosinusni talasi. Jedna funkcija i njene dilatacije i prevodi mogu se koristiti za generisanje skupa ortonormalnih osnovnih funkcija za predstavljanje signala [163]. Ovo bi doprinelo tome da se podaci kondenzuju i u vremenskom i u frekvencijskom području. Ta ideja dovela je do uvođenja talasića. Na slici 5.10. je prikazan primer talasića.



Slika 5.10. Prikaz talasića u kratkom vremenskom intervalu.

Matematički, talasić je predstavljen funkcijom

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \tag{5.14}$$

gde je a parametar skaliranja, a b parametar položaja.

Da bi funkcija bila u obliku talasića, trebalo bi da bude vremenski ograničena. Za dati parametar skaliranja a, talasić se prevodi variranjem parametra b.

Diskretna talasna transformacija je tehnika za transformisanje slikovnih piksela u talasiće, koji se zatim koriste za kompresiju i kodiranje [163].

Kod diskretne transformacije talasićem (DWT) signal se analizira malim brojem skala sa varirajućim brojem prevođenja na svakoj skali. Kod kritičnog uzorkovanja kod kontinualne transformacije talasića (CWT), $W(a, b)$ je dobijen supstitucijom $a = 2$ -j i $b = k_2$ -j gde su j i k celi brojevi koji predstavljaju skalu i prevođenje.

Nakon ove zamene,

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2}\Psi\left(2^j t - k\right). \tag{5.15}$$

Ovi talasi za sve brojeve j i k proizvode ortonormalnu osnovu, pri čemu je

$$\Psi_{0,0}(t) = \Psi(t) \tag{5.16}$$

matični talas.

Ostali talasići se proizvode prevođenjem i dilatacijom matičog talasa. Diskretna transformacija talasićima, označena sa $W(j, k)$ sada je data kao

$$W(j,k) = \int_t \mathrm{f}(t)2^{j/2}\Psi(2^j t - k)\, dt. \tag{5.17}$$

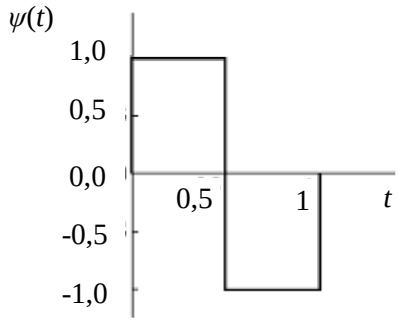
Za razliku od Furijerove transformacije, različiti kompleksni talasići se koriste za analizu signala. Najjednostavniji skup talasića odredjen je Haarovom funkcijom i funkcijom skaliranja.

WLT u ovom istraživanju je primenjena na osnovu Haarovih talasa. Izdvojena su i analizirana diskretna *wavelet* obeležja slike [112]. Implementacija je izvedena dobijanjem varijacija visokofrekventnih podopsega talasne transformacije svake regije mreže slike. Frejm je podeljen na 4·4 = 16 regiona mreže, a primenjena je Haarova talasna transformacija na 4 nivoa, kako bi se dobila odstupanja visokofrekventnih podzona (u našem slučaju, 12 podopsega) svakog regiona. Dobijeni vektor obeležja ima 4 · 4 · 12 = 192 koordinate.

Haar funkcija talasića, označena sa $\psi(t)$, data je izrazom

$$\Psi(t) = \left\{\begin{matrix} 1, & 0 \le t \le 1/2 \\ -1, & 1/2 \le t \le 1 \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{matrix}\right\}. \tag{5.18}$$

Na slici 5.11. je prikazana Haarova funkcija talasića:



Slika 5.11. Haarova funkcija talasića.

Kao i sve transformacije na bazi talasića, Haarova transformacija dekomponuje diskretni signal na dva podsignala, u trajanju polovine njegove dužine. Jedan podsignal je se odnosi na tekuće srednje vrednosti ili trend, dok se drugi podsignal odnosi na tekuću razliku ili fluktuacije.

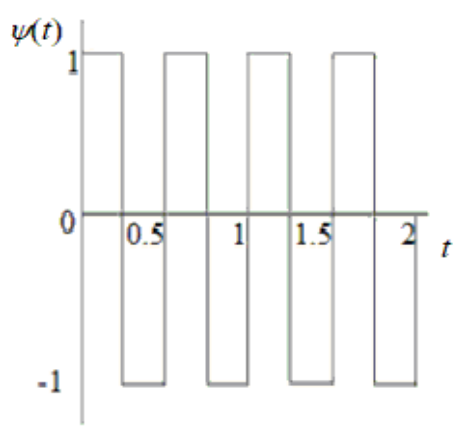
Set funkcija $\Psi(t-k), k \in N$ formira ortonormalan bazični set. To je predstavljeno sledećim izrazom:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t-m)\Psi(t-n)dt = \delta_{m-n}. \tag{5.19}$$

Ako se posmatra Haarova funkcija talasića $\Psi(t)$ skalirana faktorom 2, tada će se novi osnovni set formirati tako da sadrži bazične funkcije $\Psi(2t)$ i vrši se translacija $\Psi(2t-k), k \in N,$ na sledeći način:

$$\Psi(t) = \begin{Bmatrix} 1, & 0 \le t \le 1/4 \\ -1, & 1/4 \le t \le 1/2 \\ 0, & \text{u ostalim slučajevima} \end{Bmatrix}. \tag{5.20}$$

Na slici 5.12. je prikazana Haarova funkcija talasa kratke forme i njena skalirana verzija faktorom 2.



Slika 5.12. Skalirana verzija Haarove funkcije talasa kratke forme $\Psi(t)$.

5.4.2 Merenje sličnosti vektora obeležja

Za potrebe karakterizacije teksture, potrebno je uvesti određene mere sličnosti vektora obeležja dobijenih ekstrakcijom obeležja teksture. Izračunate su tri mere za sličnosti vektora obeležja: euklidsko rastojanje (*d*), korelacija (*R*) i normalizovana srednja razlika (*D*) između prosečnih i srednjih vrednosti.

Kombinacija ovih triju mera daje nam precizniji rezultat klasifikacije, jer je analizirana finija tekstura puta, a svako navedeno merenje opisuje sličnosti vektora obeležja, ali na drugačiji način. Euklidsko rastojanje daje kumulativnu meru razlike komponenti vektora. Korelacija opisuje sličnost između paterna koji stvaraju komponente pojedinih vektora obeležja. Normalizovana srednja razlika opisuje raspodelu vrednosti komponenti za razlike između srednjih vrednosti i medijane. Na osnovu ovih merenja, dalje klasifikovanje teksture moglo bi se izvršiti korišćenjem statističkih algoritama.

Da bi se odredila sličnost između vektora obeležja, bilo je potrebno definisati referentnu vrednost, odnosno referentni vektor u odnosu na koji će se meriti sličnost svih drugih vektora obeležja. Metod određivanja referentnog vektora dat je na kraju ovog poglavlja. Sličnosti vektora obeležja u ovom radu date su kroz sledeće metrike:

5.4.2.1 Euklidsko rastojanje – *d*.

Euklidsko rastojanje je udaljenost između vektora obeležja svakog frejma i referentnog vektora. Ovo merenje ukazuje na blizinu tačaka u hiper-prostoru, ali ne može identifikovati sličnosti u strukturi komponenti vektora.

Neka X_j bude vektor obeležja tekućeg frejma:

$$X_j = \left[X_{j1} \ \dots \ X_{jk} \dots \ X_{jN}\right]. \tag{5.21}$$

gde j=1…F, i X_{jk} predstavlja k-tu koordinatu vektora obeležja, N je broj koordinata vektora i F predstavlja ukupan broj analiziranih frejmova.

Euklidsko rastojanje d, između vektora obeležja može biti izraženo na sledeći način:

$$d_{j,REF} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(X_{ji} - X_{REF,i}\right)^2}\,, \tag{5.22}$$

gde je j=1…F, i X_{ji} je koordinata vektora obeležja tekućeg frejma, i $X_{REF,i}$ je koordinata referentnog vektora obeležja. Za potrebe eksperimentalne analize, procenjen je referentni vektor. Vektor obeležja kome je odgovaralo najveće euklidsko rastojanje, odabran je kao referenca, odnosno referentni vektor. Dalja merenja i analize bazirane su na statističkim alatima koji opisuju sličnost referentnog sa ostalim vektorima ekstrakcije obeležja teksture, a sva izračunavanja su sprovedena prema referentnom vektoru. U tabeli 5.2 prikazani su grafici koji predstavljaju sumu euklidskih rastojanja vektora dobijenih ekstrakcijom obeležja Gaborovom transformacijom, *co-occurrence* matricom, ivičnim histogramom i transformacijom talasićima, a u tabeli 5.3. grafici koji predstavljaju euklidska rastojanja pojedinačnih vektora obeležja od referentnog vektora za sva četiri napred pomenuta pristupa ekstrakcije obeležja teksture, respektivno.

5.4.2.2 Korelacija - R.

Kao mera korelacije izračunat je Pirsonov (*Pearson*) koeficijent, koji je adekvatno opisao sličnost referentnog i ostalih vektora obeležja, sa njihovom komponentnom strukturom.

Pirsonov koeficijent korelacije *R*, definisan je izrazom:

$$R_{j,REF} = \left| \frac{\sum_i X_{ji} X_{REF} - \frac{\left(\sum X_{ji}\right)\left(X_{REF}\right)}{N}}{\sqrt{\left(\sum_i X_{ji}{}^2 - \frac{\left(\sum_i X_{ji}\right)^2}{N}\right)\left(\sum X_{REF}{}^2 - \frac{\left(X_{REF}\right)^2}{N}\right)}} \right|, \tag{5.23}$$

gde i=1…N i j=1…R.

U tabeli 5.4. prikazani su grafici koji predstavljaju meru korelacije referentnog vektora sa drugim vektorima dobijenih ekstrakcijom obeležja prema njihovoj komponentnoj strukturi. Pirsonov koeficijent je računat respektivno za pristup analizi teksture Gaborovom transformacijom, *co-occurrence* matricom, ivičnim histogramom i talasnom transformacijom.

5.4.2.3 Normalizovana srednja razlika- D

Poređenje razlika između srednje vrednosti i medijane, dato je jednačinom (5.24). Ovo je omogućilo da se, *a priori* postojeće komponente vektora obeležja razlikuju prema distribuciji.

Normalizovana srednja vrednost razlike *D*, izračunava se na sledeći način:

$$D_j = \left| \frac{mean(X_j) - median(X_j)}{median(X_j)} \right|, \tag{5.24}$$

$$D_{j,REF} = D_j - D_{REF}, \tag{5.25}$$

gde i=1…N i j=1…R, a srednja vrednost i medijana predstavljaju standardne statističke mere centralne tendencije skupa podataka. U ovom konkretnom slučaju, analiziran je skup vektora obeležja koji se odnosi na sve frejmove.

Definisanje referentnog vektora obeležja podrazumeva izbor vektora, u odnosu na koji se meri sličnost, tabela 5.5. Jedan način jeste da se pronađe vektor obeležja koji je najudaljeniji od svih drugih vektora, tj. koji ima najveće euklidsko rastojanje od njih.

Referentni vektor se predstavlja na sledeći način:

$$S_j = \sum_k d_{j,k} \qquad k = 1 \dots R, \tag{5.26}$$

$$X_{REF} = \left\{ X_j | S_j = \max\{S_1, \dots, S_R\} \right\}. \tag{5.27}$$

Tabela 5.2. Prikaz suma euklidskih rastojanja između vektora dobijenih po metodama ekstrakcije obeležja teksture

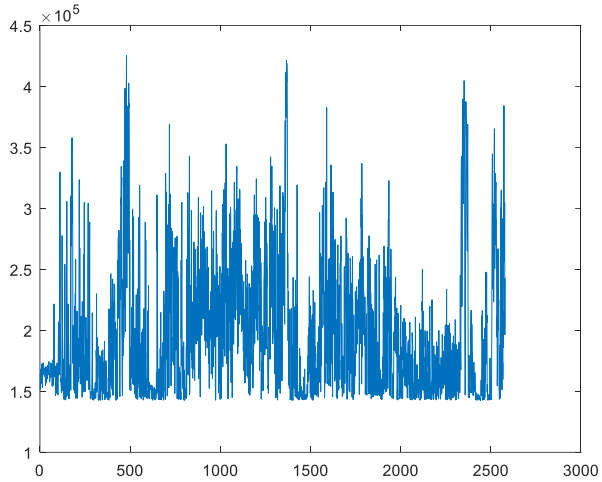
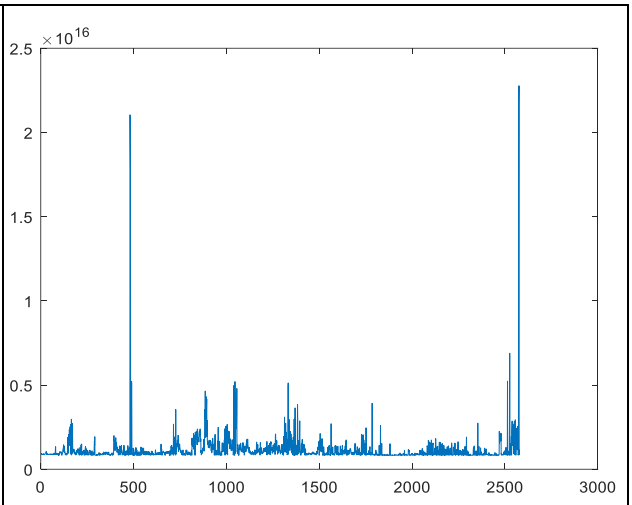
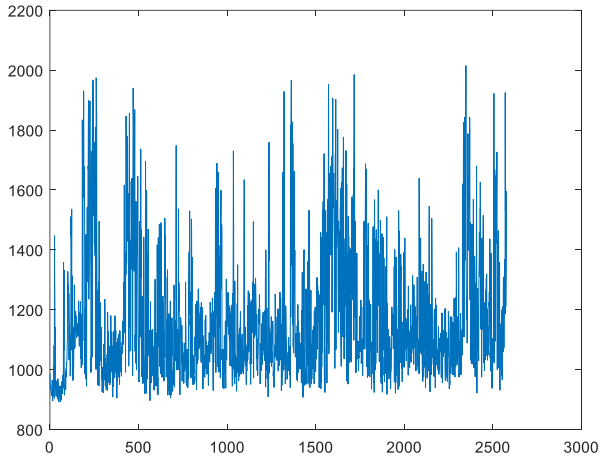
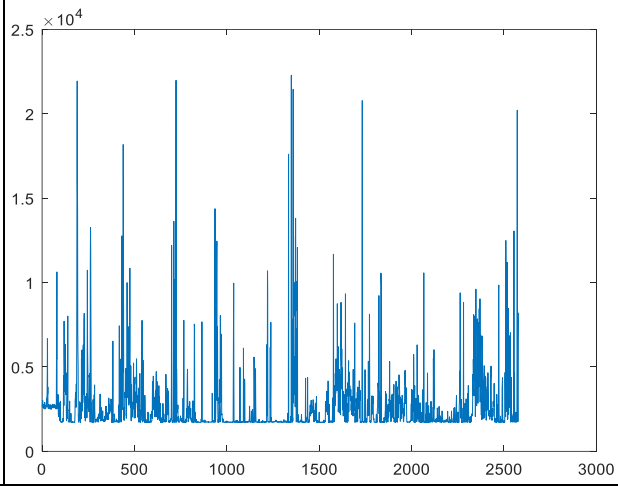
	
Ekstrakcija Gaborovom transformacijom	Ekstrakcija GLCM transformacijom
	
Ekstrakcija EHD transformacijom	Ekstrakcija DWLT transformacijom

Tabela 5.3. Prikaz euklidskih rastojanja između vektora obeležja dobijenih metodama ekstrakcije

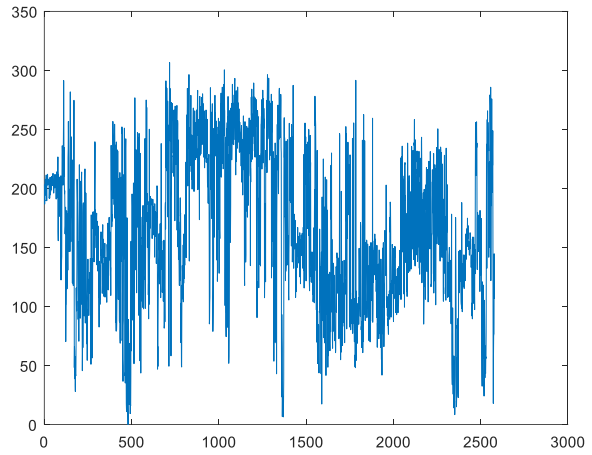
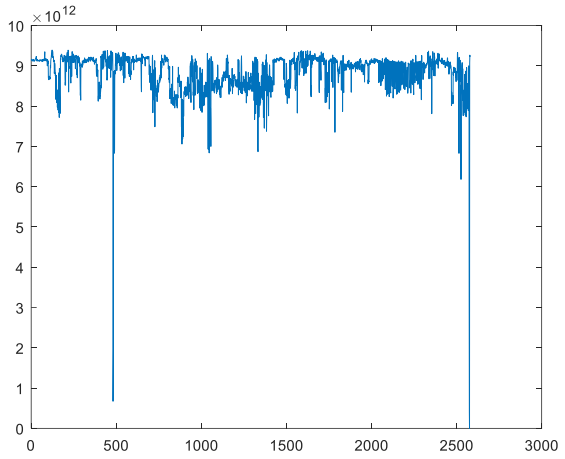
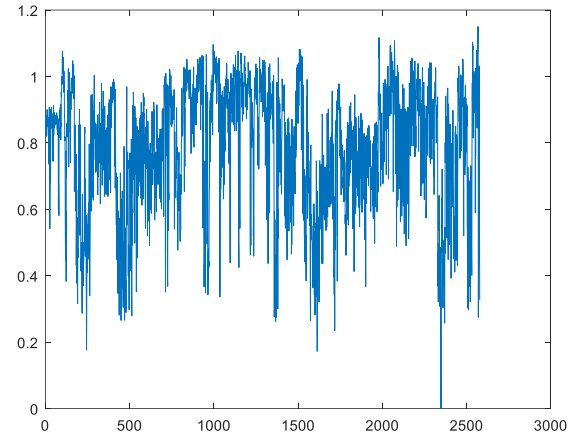
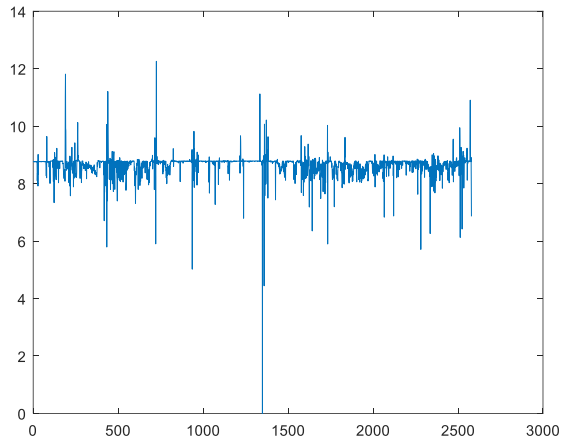
	
Ekstrakcija Gaborovom transformacijom	Ekstrakcija GLCM transformacijom
	
Ekstrakcija EHD transformacijom	Ekstrakcija DWLT transformacijom

Tabela 5.4. Mera korelacije referentnog vektora prema drugim vektorima dobijenim ekstrakcijom obeležja prema njihovoj komponentnoj strukturi

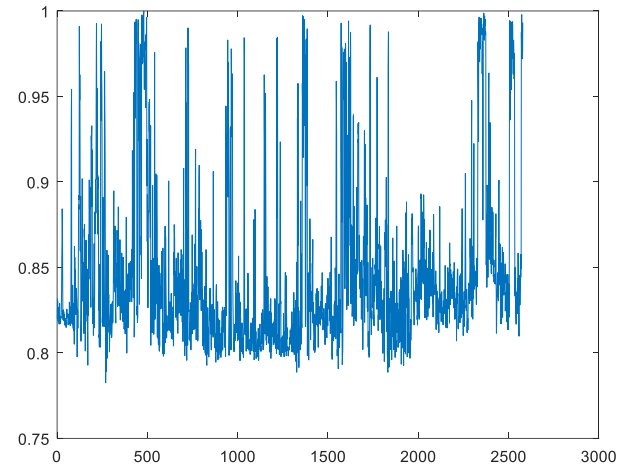
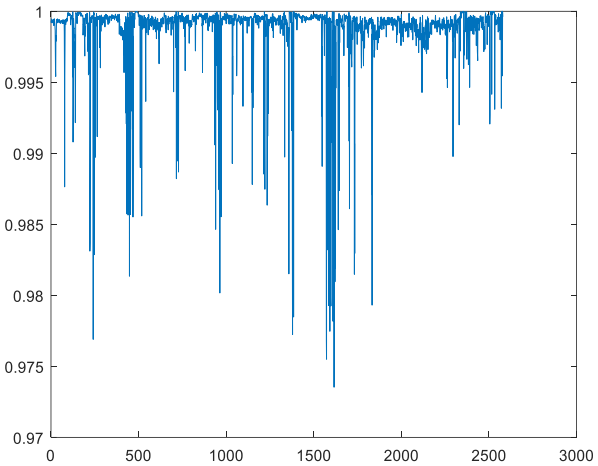
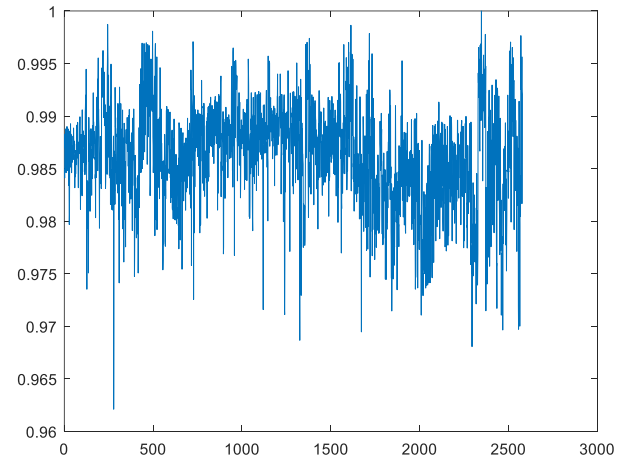
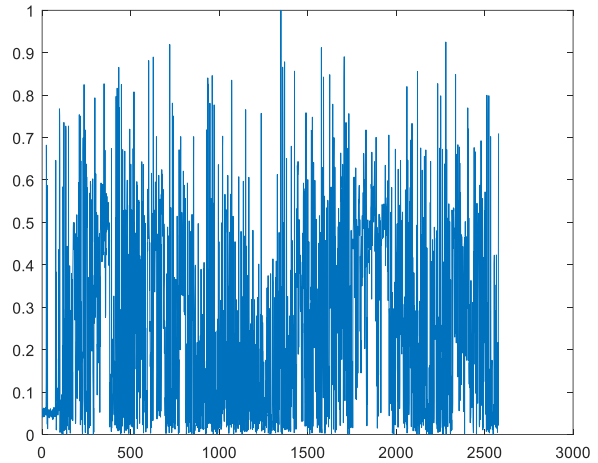
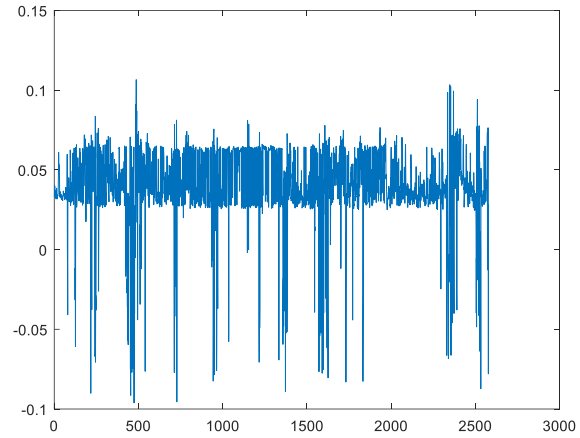
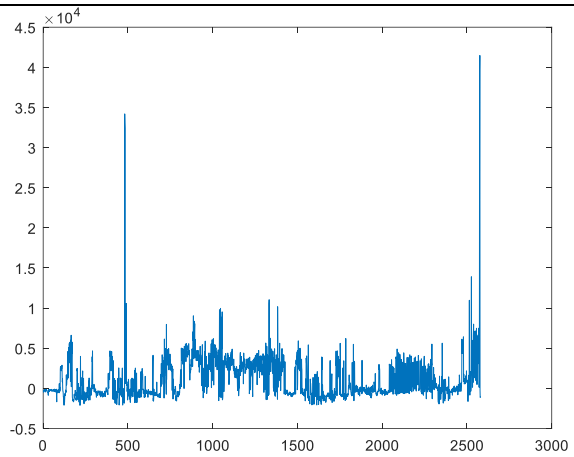
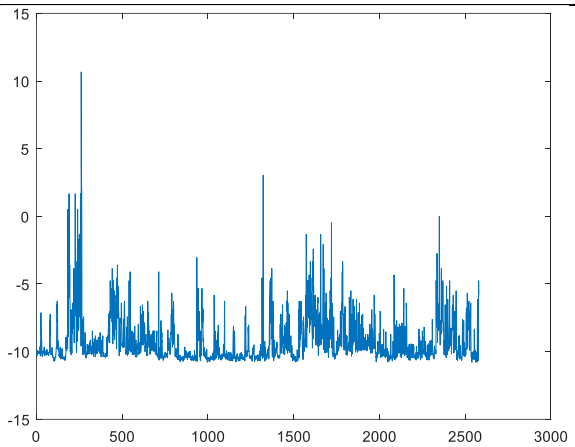
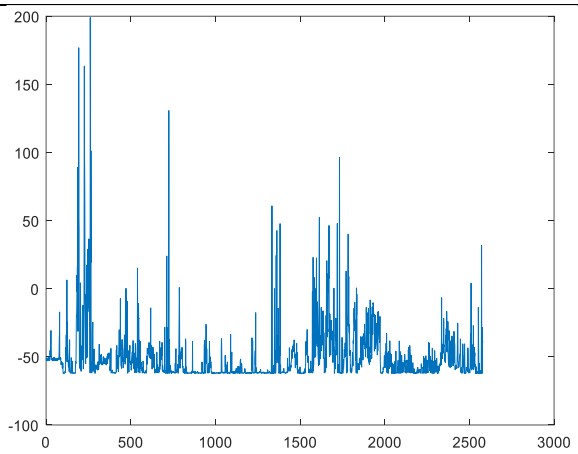
	
Ekstrakcija Gaborovom transformacijom	Ekstrakcija GLCM transformacijom
	
Ekstrakcija EHD transformacijom	Ekstrakcija DWLT transformacijom

Tabela 5.5. Prikaz normalizovane srednje razlike vektora obeležja, dobijenih ekstrakcijom obeležja teksture

	
Ekstrakcija Gaborovom transformacijom	Ekstrakcija GLCM Transformacijom
	
Ekstrakcija EHD tranformacijom	Ekstrakcija DWLT transformacijom

5.4.3 Klasifikacija vektora obeležja

Nakon ekstrakovanja vektora obeležja teksture, metrike (*d, R* i *D*) su računate za svaki pojedinačni vektor obeležja, u odnosu na referentni vektor. Dobijene vrednosti su kombinovane i predstavljene u 3D prostoru. Na osnovu klasterizacije prema pomaku srednje vrednosti (*mean-shift clustering*) [164] dobijaju se numeričke vrednosti pragova između određenih klastera tačaka koje predstavljaju kandidate za klasifikaciju teksture. Određene oblasti površina mogu da formiraju tačke klastera, koje dalje predstavljaju različite klase teksture.

5.5 Akvizicija podataka o temperaturi putne površi

Kao što je ranije pomenuto, merenje temperature površine puta iz vozila u pokretu je uobičajena tehnika [7, 8], radi analize uticaja temperature na druge parametre u programima ocene puteva. U ovom istraživanju, temperatura površine merena je daljinski, koristeći infracrveni senzor postavljen na braniku vozila.

Temperatura je merena kontinualno, a na svakih 50 m računata je prosečna vrednost. Ovakva metodologija je u skladu sa preporukama za sigurnost na putevima [7].

Značajne fluktuacije u temperaturi asfalta ili betona obično se ne dešavaju tokom dnevne svetlosti, u konstantnim sunčanim vremenskim uslovima (tj. kada nema kiše, snega ili leda na putu, i kada nema velikih brzina vetra u blizini površi puta, itd.).

U ovoj disertaciji vršena su merenja površinske temperature puta, kako bi se potvrdile klase teksture.

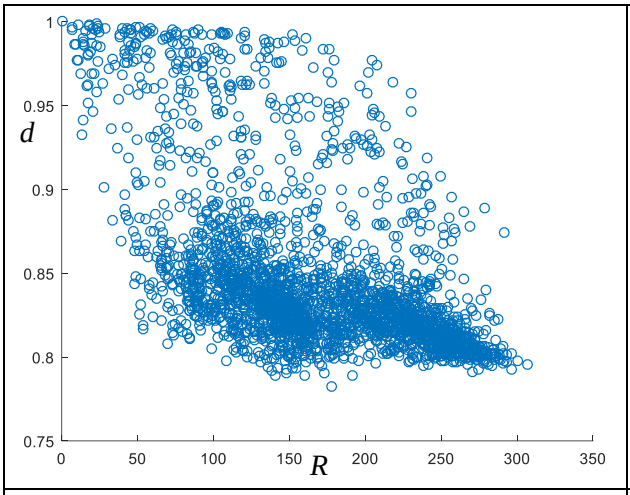
Uočene su značajne promene temperature, kada su se segmenti puta nalazili u hladu, u senkama, sa veoma malo sunčevog uticaja ili bez njega. Ovo je, dalje, pružilo dodatne informacije za validaciju klasa i za konačnu klasifikaciju teksture površi, a na osnovu analize teksture same slike puta.

5.6 Rezultati i diskusija

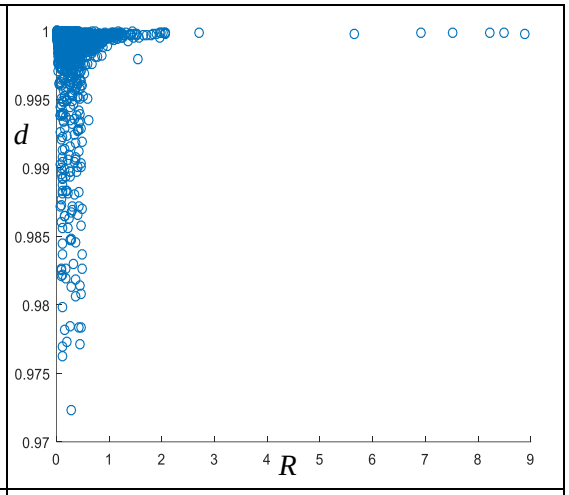
Pokretna kamera je snimila 11300 frejmova, u uslovima dnevne svetlosti. Svaki frejm je sečen na oblast od interesa, tj. na područje koje se odnosi na širinu kolotraga zadnjeg levog točka vozila. Dalje, svaki frejm u boji pretvoren je u sivu skalu, a opsečeni frejmovi su normalizovani po intenzitetu piksela. Ovo je minimiziralo neke od irelevantnih svojstava površinskih agregata.

Ekstrakcija obeležja teksture izvršena je korišćenjem napred navedenih metoda: Gaborove transformacije; GLCM; EHD; i Haarove funkcije talasića. Dvodimenzionalni 2D koordinatni sistem definisan je dvema metrikama: euklidskim rastojanjem - *d* i korelacijom - *R*, dok je trodimenzionalni 3D koordinatni sistem definisan pomoću tri metrike, euklidskim rastojanjem *d*, korelacijom *R* i normiranom razlikom srednje vrednosti i medijane *D*. U prvom pristupu urađena je analiza dvodimenzionalne raspodele obeležja frejmova u tabeli 5.6, za sve četiri metode ekstrakcije obeležja.

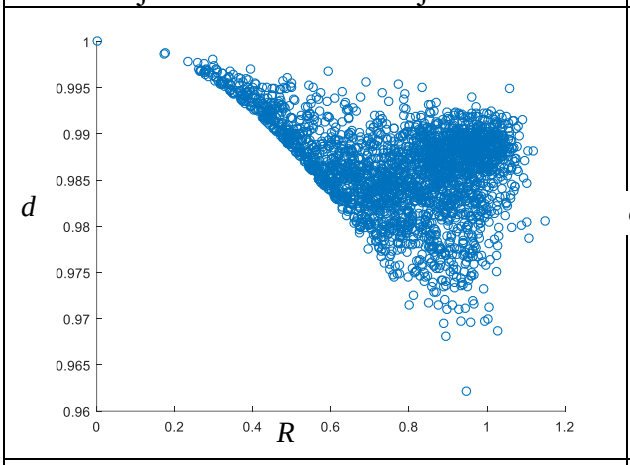
Tabela 5.6. Dvodimenzionalni pristup analizi vektora obeležja, preko metrika euklidskog rastojanja *d* i korelacije *R*



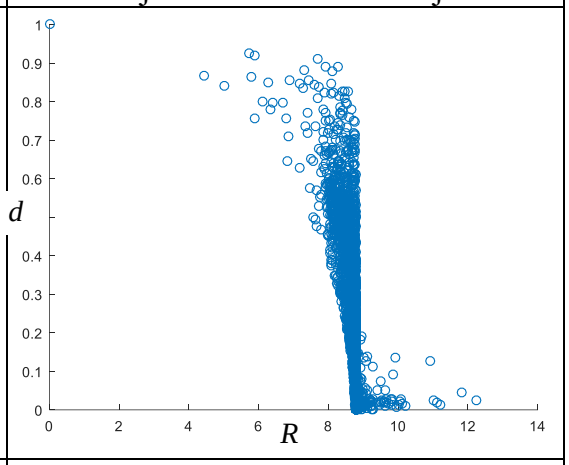
Ekstrakcija Gabor transformacijom



Ekstrakcija GLCM transformacijom

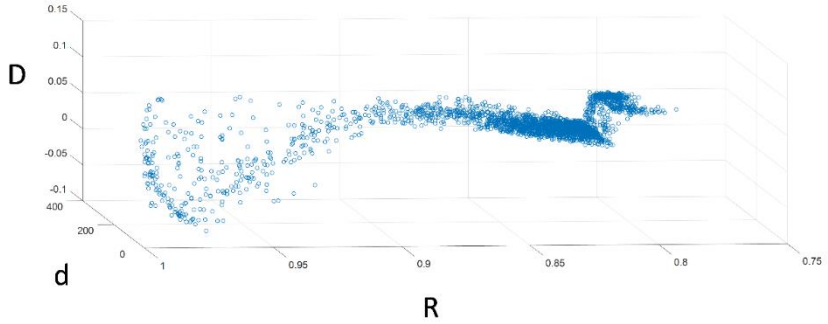


Ekstrakcija EHD transformacijom

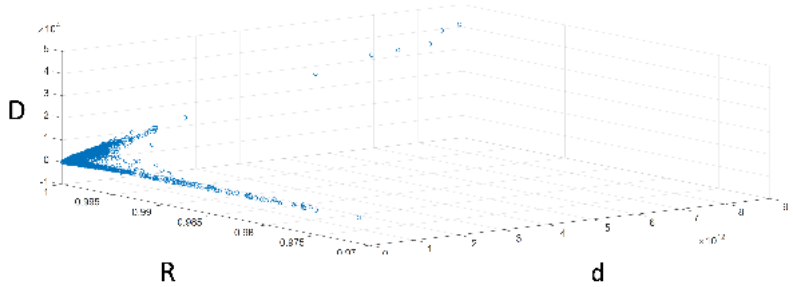


Ekstrakcija DWLT transformacijom

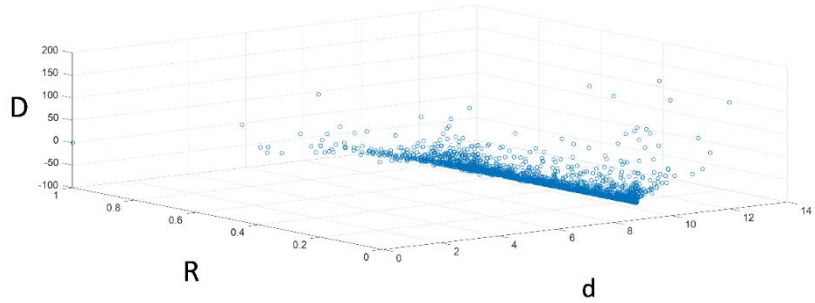
Vektori obeležja teksture snimljenih frejmova, dobijeni Gaborovom transformacijom, statistički su obrađeni pomenutim algoritmima, i oni su prikazani tačkama, prostorno raspoređenim u 3D dijagramu, prikazanom na slici 5.13.a). Distribucija prostornih tačaka, koja predstavlja vektore obeležja teksture odgovarajućih frejmova, ekstrakovana preostalim trima metodama, prikazana je na slikama 5.13.b), 5.13.c) i 5.13.d), respektivno.



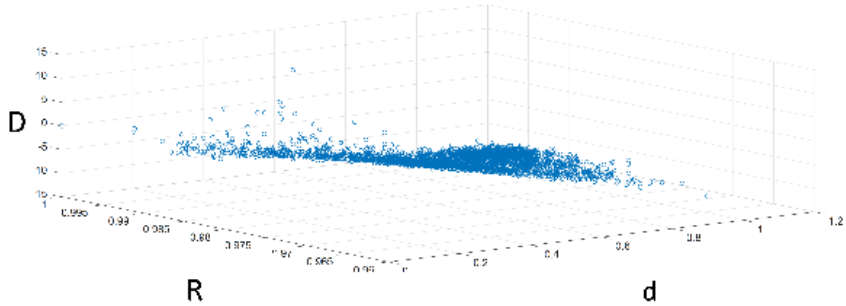
a)



b)



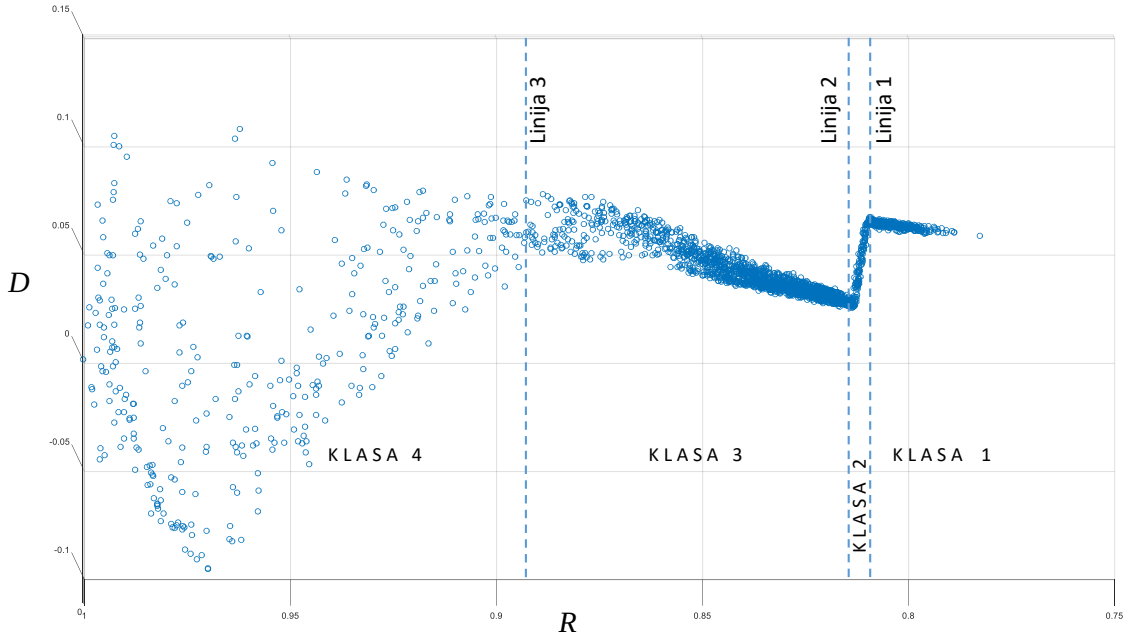
c)



d)

Slika 5.13. Trodimenzionalna prezentacija raspodele frejmova zasnovana na ekstrakciji vektora obeležja teksture, korišćenjem (a) Gaborove transformacije, (b) GLCM transformacije, (c) EHD transformacije i (d) DWT transformacije.

Primena preostale tri metode ekstrakcije obeležja, kao što su GLCM, EHD i DWT, nije pogodna za detektovanje odvojenih jasnih klastera slika putne površine, dobijenih snimanjem kamerom u pokretu. Budući da je Gaborova transformacija pokazala različite varijacije tačaka u trodimenzionalnom prostoru, odabrana je u predloženoj metodologiji za diferencijaciju frejmova, a zatim i za klasterizaciju, slika 5.14.



Slika 5.14. Dvodimenzionalna klasifikacija frejmova, prema Gaborovoj transformaciji.

Dakle, s obzirom na to da već poznate metodologije automatskog procesa klasterizacije ne mogu efikasno da dovedu do klasifikacije puteva za potrebe ovog istraživanja, primenjena je složena procedura automatske klasterizacije i, dalje, klasifikacije koja je realizovana kroz dve faze.

U fazi 1, modifikovan je "*mean shift clustering algorithm*" [164], gde se kao kernel koristi bar-vertikalni segment. Celokupna površina grafika, na slici 5.14. fragmentisana je u vertikalne segmente - barove, širine (vrednosti korelacije, *R*) svaki po 0,01. Unutar svakog bara, je izmereno ukupno euklidsko rastojanje između svih tačaka. Tako je formiran histogram vrednosti ovih suma euklidskih rastojanja.

Minimalna vrednost u histogramu određuje poziciju linije 1, na slici 5.14. Tako smo odvojili niz rasutih tačaka, sa leve strane linije 1, kao poseban klaster, dalje posmatrano kao klasa 4. Sve ostale tačke su postavljene desno od linije 1, slika 5.15.a).

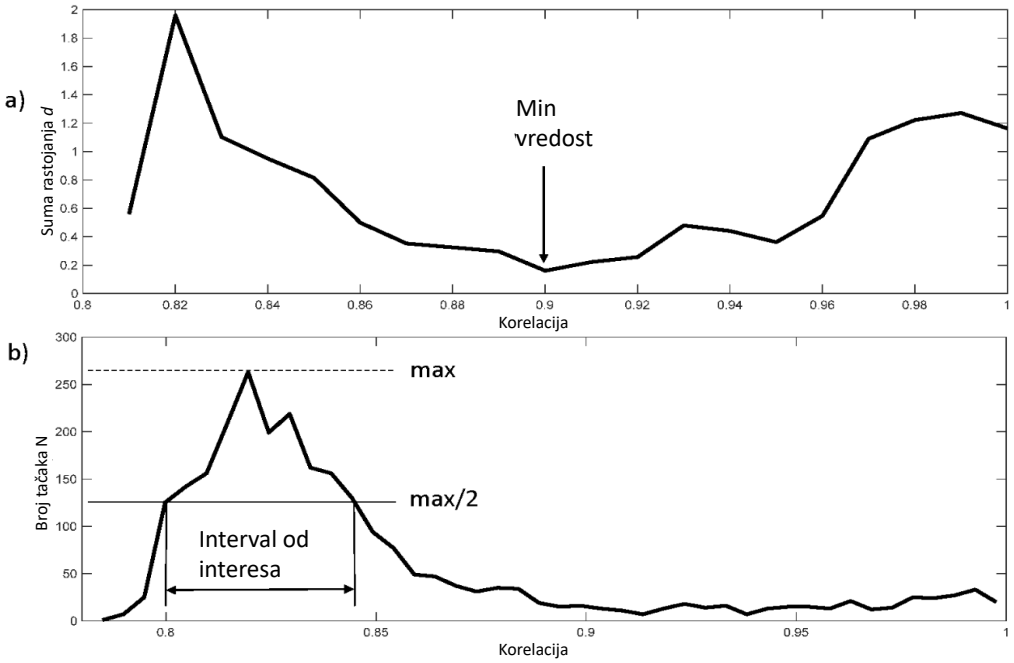
U fazi 2 posmatrane su samo tačke sa desne strane od linije 1, a određen je ukupan broj tačaka u okviru vertikalnih barova. Površina grafika, desno od linije 1, bila je fragmentisana u vertikalne barove, širine 0,005 vrednosti korelacije (*R*). Na ovaj način formiran je novi histogram prikazan na slici 5.15.b).

Detekcija intervala u okviru najveće gustine tačaka, u granicama klastera, formira liniju 2 i liniju 3, na slici 5.14.

Prag za detekciju intervala od interesa definisan je prema polovini maksimalne vrednosti histograma. Pozicija ovog praga je prikazana na slici 5.15.b). Svi barovi čiji broj tačaka prelazi definisani prag čine interval interesa. Unutar ovog intervala korelacije određuje se stvarna pozicija linija 2 i 3.

Linija 2 se određuje prolaskom kroz srednju vrednost najmanje tri tačke u detektovanom korelacionom intervalu. Linija 3 određuje se prolaskom kroz srednju vrednost tri maksimalne tačke u intervalu korelacije.

Granične vrednosti korelacije (*R*), tj. pragovi su sledeći: prva klasa do 0,8092; druga klasa do 0,8136; treća klasa do 0,8925. Četvrta klasa je iznad vrednosti 0,8925.



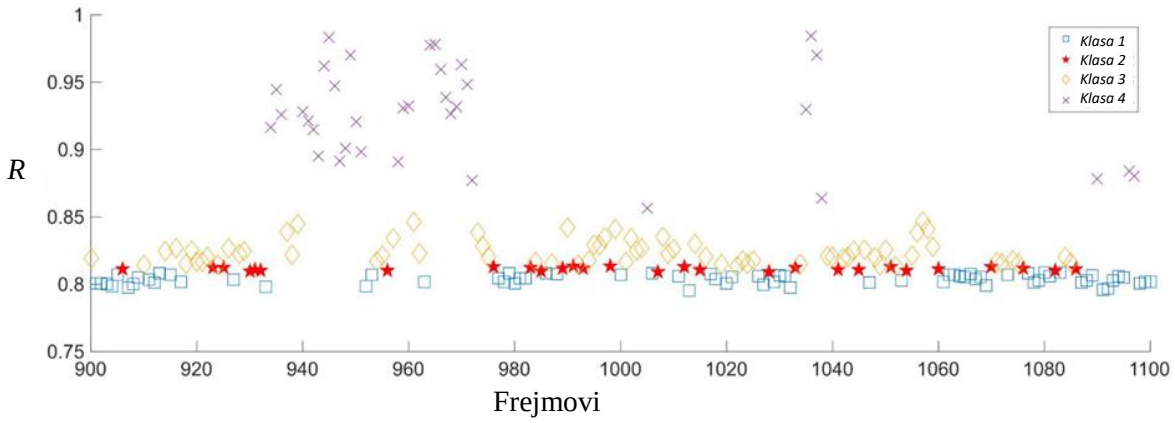
Slika 5.15. Automatizacija postavljanja praga za prepoznavanje klastera sa podacima sa slike 5.14. i to: (a) Histogram koji određuje poziciju linije 1; (b) Histogram koji određuje pozicije linija 2 i 3.

Testiran je automatizovani sistem koji nam je omogućio da definišemo jasne granice između grupe tačaka koje odgovaraju definisanim klasama rizika, i tako su identifikovana četiri odvojena klastera. Ovi klasteri su bili kandidati za klase teksture slike.

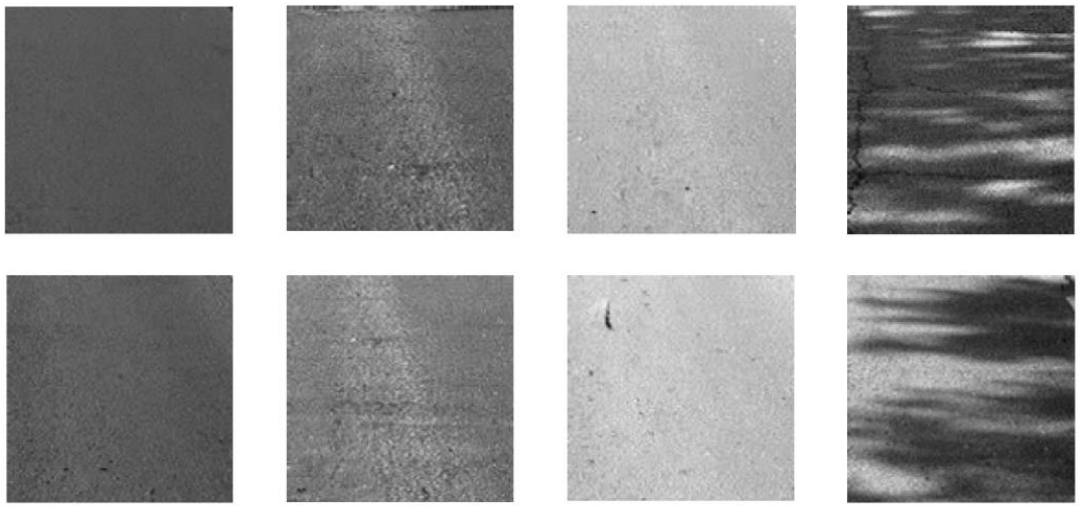
Radi klasifikacije tekstura površine puta, potrebno je integrisati klasifikaciju teksture slike u klasifikaciju teksture površine. Time je, dalje, omogućeno da se razlikuju četiri klase teksture slike, date na slici 5.14.

Na slici 5.16 ilustrovani su rezultati klasifikacije frejmova, na četiri klase zasnovane na Gaborovoj transformaciji. Ovde se uočava očigledna raznolikost frejmova koji pripadaju klasi 4. Uzorci koji predstavljaju neke od reprezentativnih frejmova, prikazani su na slici 5.17.

Na slici 5.17. jasno se vidi da slike iz klase 4 prikazuju površine puta zaklonjene nekom statičkom senkom, kao npr. krošnjama drveća, ili oblicima kao što su piloni ili dalekovodi i sl. Analiza teksture slike pokazuje da klasa 4 ne predstavlja stvarnu teksturu površi puta. Ovo je potvrđeno merenjem temperature putne površi.



Slika 5.16. Klasifikacija teksture u četiri klase, po frejmu, zasnovana na Gaborovoj transformaciji.



Klasa 1 Klasa 2 Klasa 3 Klasa 4

Slika 5.17. Reprezentativni uzorci klasifikovanih frejmova. Klase 1-3 su validirane i predstavljaju stvarnu teksturu površine puta. Klasa 4 je diskvalifikovana klasa - *missclass* i mora biti odbačena, jer ne reprezentuje stvarnu teksturu putne površi.

Merenja temperature površi puta, koja se odnose na frejmove slika u klasi 4, otkrivaju vektore obeležja izobličene statičkim senkama, na primer, od krošnji drveća ili stubova, slika 5.18. Dakle, drugi deo eksperimentalne analize površine puta sastoji se u poređenju prosečne vrednosti *R*, izračunate na sekvencama frejmova, i prikupljenih temperaturnih vrednosti.

a)

b)

c)

d)

Slika 5.18. Statičke senke na putu a) krošnja, b) pilon, c) kombinacija drveća i nadzemnih telekomunikacionih uporišta, d) jarboli sa zastavama.

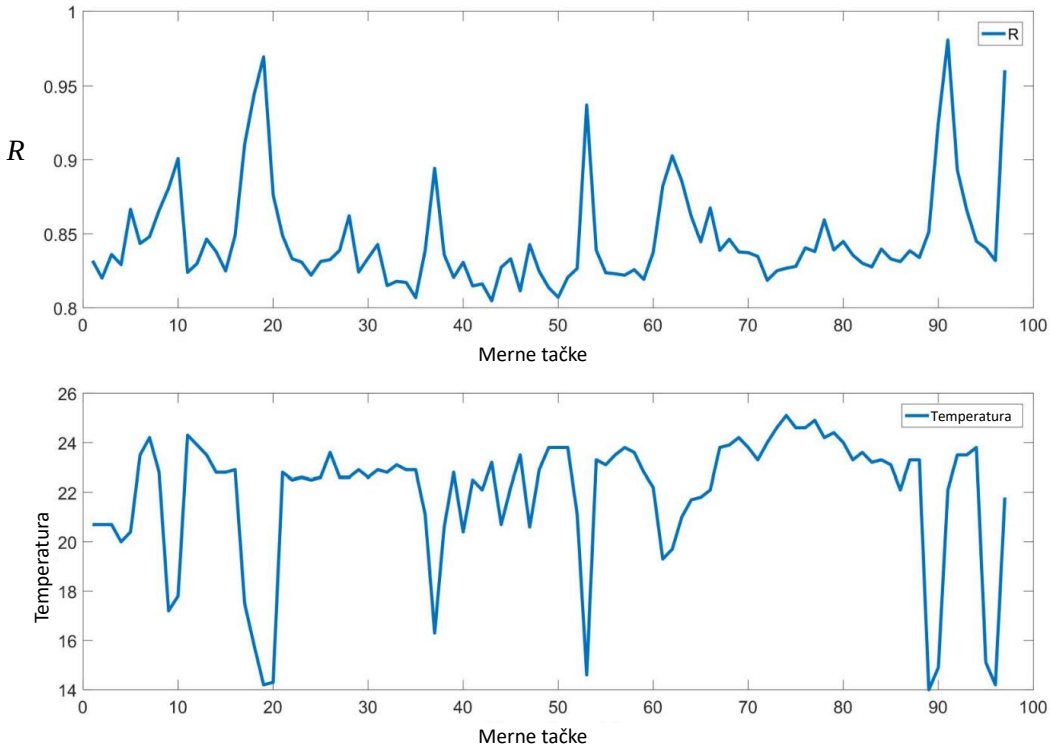
Navedena temperatura površi puta je merena sa vozila u pokretu i usrednjavana u intervalu od 50 m [7, 8]. Upotrebljen je senzor za daljinsko merenje temperature putne površi, VAISALA DS111, prikazan na slici 5.19. Osobine ovog senzora su takve da se može meriti temperatura putne površi, uz mogućnost korekcije emisivnosti same površine. On nema interne pokretne delove i daje stabilne rezultate merenja, nezavisno od opterećenja saobraćajnice.

Merenje temperature uvedeno je radi poboljšanja klasifikacije teksture površi puta. Srednja vrednost R grupe frejmova je upoređena sa srednjom vrednošću temperature, budući da su merenja i snimanje kamerom realizovani u istim vremenskim intervalima. Pošto su i podaci o temperaturi i video-podaci referencirani GPS koordinatama, bilo je moguće i prostorno uporediti ova dva skupa podataka.

Slika 5.19. Senzor za daljinsko merenje temperature - VAISALA DS111.

Poređenje prosečne vrednosti korelacije frejmova *R* po klasama i prosečne temperature, prikazano je na slici 5.20.

Ukupna vrednost koeficijenta korelacije između ove dve krive je $R_{F\text{-}T}$ = 0,5651, što ukazuje na srednji stepen korelisanosti između krivih. I pored toga, očigledno je da ekstremumi temperaturnih vrednosti i vrednosti korelacije frejmova, koreliraju u kontra-fazi. Ovo upućuje na to da u istim segmentima putne površi u kojima je tekstura slike klasifikovana u klasu 4, postoje i značajni padovi vrednosti temperature površi. Zaključak je da je u tim segmentima puta, prema poklapanju ekstremuma obe krive, klasa 4 teksture slike nastala kao posledica različitih vrsta statičkih senki i da ne odgovara teksturi same putne površi. Treba takođe naglasiti da promene u teksturi površi puta ni ne mogu da prouzrokuju značajne promene površinske temperature [126].



Slika 5.20. Poređenje prosečne vrednosti *R* i prosečne temperature.

Shodno tome, klasa 4, prikazana na slici 5.15, mora biti diskvalifikovana u smislu klase putne površi. Stoga se predložena metodologija za korišćenje obrade slike iz kamere u pokretu, može potvrditi kao tačna, kako bi se dalje karakterisala tekstura površi puta.

Ovo znači da je potvrđeno da se površ puta, prema svojoj teksturi, može svrstati u tri klase.

5.7 Predikciija rizika na putevima na osnovu klasifikacije fine teksture puta

Iz svakodnevnih iskustava u vožnji opšte poznato je da se saobraćajne nezgode na putevima javljaju češće uslovima visokog procenta vlažnosti i kada su površine puta klizave usled atmosferskih pojava (padavine - kiša ili sneg, prisustvo leda). Novi algoritam za klasifikaciju puteva prema finoj površinskoj teksturi, koji je predstavljen u ovoj disertaciji, rezultira predikcijom rizika i, prema tome, kategorizacijom magistralnih putnih deonica u Srbiji.

Klase teksture se razlikuju prema svojoj uniformnosti. Ukoliko je tekstura homogenija i ispoljava ujednačene granulometrijske karakteristike i raspodelu agregata, znači da je površina sigurnija za vožnju i nije sama po sebi glatka. Trenje na ovakvim putevima je zadovoljavajuće i put neće biti klizav.

Ako tekstura puta nije uniformna, to znači da postoji određeni stepen degradacije, u smislu da može biti previše polirana ili previše uglačana. Takvi delovi puta su opasni, bez obzira na efekte atmosferskih uslova ili dugih spoljnih faktora.

U klasifikaciji putne površi u ovom istraživanju, kao što je prikazano na slici 5.14, očigledno je da su klasa 1 i klasa 2 u velikoj meri ujednačene po teksturi, a da klasa 3 i klasa 4 to nisu.

Klasa 1 teksture pokazuje najviši stepen uniformnosti. To znači da je granulometrija sastava putne površi ujednačena i dobro očuvana. Ona ne predstavlja opasan segment puta u smislu proklizavanja.

Klasa 2 se odnosi na promene teksture usled topljenja bitumena prilikom visokih letnjih temeperatura, tako da površina puta postaje više "uglačana", (eng. "*bleeding*"), što svakako smanjuje otpornost na proklizavanje, pogotovo u prisustvu vode ili drugih fluida na putu. U ovom slučaju nastaje degradacija granulata teksture na određenim mestima, što može biti veoma opasno po učesnike u saobraćaju u pojednim delovima puta. Klasa 2 je stoga granična kategorija površine koja može biti veoma glatka na nekim deonicama.

Za ovakva stanja putne površi predlaže se dalja analiza korišćenjem neuralnih mreža za detekciju precizne lokacije opasnih tačaka. Druga opcija bi bila upotreba Internet mreže vozila (*Internet of Vehicles network*) [165]. Ova kategorija površi puta predstavlja samo 7% površine cele posmatrane magistralne putne deonice.

Klasa 3 predstavlja najviše uglačanu površ puta i rizičnija je od klase 2. Klasa 3 predstavlja opasan, potencijalno klizav i veoma gladak put.

Prema ovim klasifikacijama, u smislu otpornosti putne površi na proklizavanje, može se uraditi mapiranje puta u kome će biti diferencirane tri klase puta, slika 5.21.a):

1. Put visokog rizika, potencijalno klizav, posebno opasan put pri vožnji u vlažnim uslovima (klasa 3).

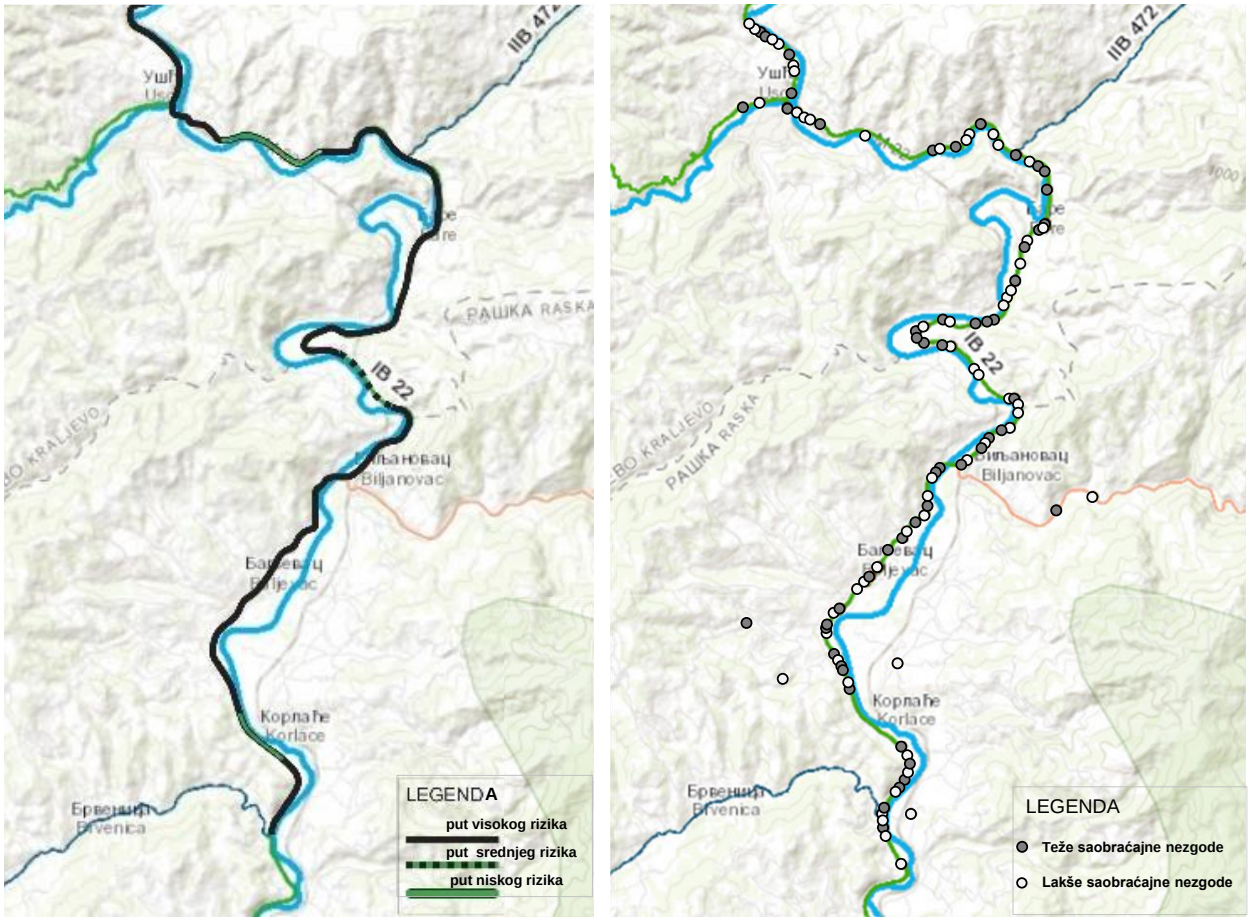
2. Put srednjeg rizika, granični put (klasa 2)

3. Put niskog rizika, put sa najvećim otporom na proklizavanje (klasa 1).

U delovima puta gde su detektovane rizične površine, vozači treba da preduzimaju mere predostrožnosti i budu pripremljeni za glatke, klizave površi i, posledično, opasne uslove vožnje.

Mapiranje puteva u ovom istraživanju, zasnovano na predviđanju rizika upotrebom klasifikacije fine teksture, upoređeno je sa dostupnom statistikom saobraćajnih nezgoda sa iste deonice puta, sa koje su dobijeni video-snimci putne površi. Korišćeni su podaci iz "Integrisane baze podataka o obeležjima bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji" za 2015., 2016. i 2017. godinu, koju je obezbedila Agencija za bezbednost saobraćaja na putevima Republike Srbije [166].

Na slici 5.21.b) predstavljena je mapa lokacija saobraćajnih nezgoda koje su se desile kao posledica proklizavanja, a dogodile se u 2015., 2016. i 2017. godini, na istom delu puta koji je korišćen u ovom istraživanju, a to je deonica između mesta Ušće i Brvenik, u centralnoj Srbiji [166].



Slika 5.21. Uporedno mapiranje puta predloženim algoritmom i mapa stvarnih nezgoda na tom segmentu puta: (a) Predloženo mapiranje puta, prema algoritmu predviđanja rizika na putevima, i (b) Mapa saobraćajnih nezgoda, kao posledica proklizavanja, prema Integrisanoj bazi podataka o obeležjima bezbednosti saobraćaja u Republici Srbiji, za 2015., 2016. i 2017. godinu.

Tačke na slici 5.21.b) prikazuju mesta saobraćajnih nezgoda prouzrokovanih proklizavanjem vozila na klizavim površinskim slojevima puta. Tamne tačke predstavljaju teže, dok svetle tačke predstavljaju lakše saobraćajne nezgode. Sve saobraćajne nezgode prikazane na slici 5.21.b), dobijene su iz Policijskih uprava Kraljevo, Raška i Novi Pazar, a odnose se na godine 2015., 2016., i 2017. [166]. Vozilo iz kojeg je zabeležena video-sekvenca kretalo se istim delom puta.

Filtriranje podataka u vezi sa proteklim saobraćajnim nezgodama na slici 5.22.b), izvršeno je po kriterijumu „Klizav kolovoz zbog vremenskih uslova “.

Poređenjem informacija prikazanih na slici 5.21.a), i slici 5.21.b), formulisana je predložena mapa rizika, svrstavanjem kvaliteta putne površi, prema mogućim posledicama, u tri klase: visok, srednji i nizak rizik, uključujući podatke koji se odnose na realne saobraćajne nezgode prouzrokovane klizavim putevima. Može se zaključiti da segmenti puta, definisani kao zone visokog rizika (sl. 5.22.a), u potpunosti odgovaraju lokacijama gde su se saobraćajne nezgode zaista dogodile u godinama 2015., 2016. i 2017. (slika 5.22.b). Od 98 saobraćajnih nezgoda, u navedene tri godine, samo se jedna dogodila u delu puta koji je klasifikovan kao “deonica niskog rizika”, dve nesreće su se dogodile u delu puta klasifinovanom kao “deonica srednjeg rizika”, a 95 nesreća se dogodilo u deonici klasifikovanoj kao “visoki rizik”.

Ovo poređenje potvrđuje validnost algoritma za predviđanje rizika.

Poboljšanje bezbednosti na putevima, posebno na onima sa srednjim rizikom, koji su najmanje kontrolabilni, može se postići obezbeđivanjem tehnologija za povezivanje u globalnu inteligentnu transportnu mrežu - *Internet of Vehicles* – IoV, [165, 167].

Vozila u IoV-u mogu međusobno komunicirati kako bi odredila i međusobno podelila status rizika na putevima i omogućila vozačima da se prilagode i reaguju u realnom vremenu. IoV, stoga može biti vredan dodatak uspostavljenom mapiranju zona rizika.

Najznačajniji doprinos ovog algoritma predstavlja upravo njegova implementacija, kao sredstva podrške za predviđanje rizika na putu za samostalno donošenje odluka o vožnji (*Autonomous driving decision making*) [168].

Razvoj autonomne vožnje prepoznat je kao jedna od najizazovnijih oblasti automatizacije. Za automatsko upravljanje automobilom mora se razviti detaljno mapiranje puta i održavanje tog mapiranja, sa naglaskom na predviđanje rizika na putevima, kako bi se izbegle nezgode i sudari vozila [165-167]. Pitanje autonomne vožnje, kao najsavremenijeg koncepta saobraćaja, ne odnosi se samo na inženjering putne infrastrukture, već i na tehnologiju razvoja samih vozila.

Taj tehnološki proces već je u velikoj meri napredovao. Suštinski problem koji zabrinjava jeste pitanje kako pripremiti i održavati puteve za automobile koji se samostalno kreću po kolovoznoj traci [168]. Ovaj algoritam može se koristiti za podršku autonomnoj vožnji i navigaciji, kroz njegovu sposobnost da locira i mapira zone visokog rizika i predvidi opasne uslove vožnje.

6. Zaključak

Razmatranje faktora koji utiču na kvalitet transporta ljudi i materijalnih sredstava, uticaj puta, preciznije rečeno, njegov sastav i geometrija, smatra se jednim od najznačajnijih faktora koji doprinose bezbednosti svih učesnika u saobraćaju. Putna površ i njena analiza predstavlja konstantan problem današnje inženjerske prakse koja u multidisciplinarnom pristupu glavni akcenat stavlja na dijagnostiku stanja puteva, te blagovremenu detekciju nastalih, odnosno predikciju budućih promena. Sve ovo se radi sa ciljem formiranja procedura i algoritama koji mogu biti od velikog značaja za smanjenje broja saobraćajnih nezgoda i ublažavanje njihovih posledica. Površina puta i njene mikro i makro geometrijske karakteristike najviše utiču na događaje saobraćajnih nezgoda koje nastaju kao posledica kontakta izmedju vozila i podloge. U disertaciji je predstavljen novi algoritam za predviđanje rizika proklizavanja vozila pri kretanju kolovozom, usled lošeg prijanjanja pneumatika na putnu površ. Algoritam omogućava predviđanje nivoa opasnosti prilikom vožnje na putevima čija površ još uvek nije vidljivo degradirana. Kao glavni rezlutat primene ovog algoritma formirana je mapa rizika. Ona je kategorisana prema riziku od klizanja, a sadrži tri nivoa kategorije putne površi: visoki rizik (posebno opasni, klizavi putevi); srednji rizik; i nizak rizik (putevi koji nisu klizavi). Na deonicama puta gde je detektovan visok rizik, vozači treba da preduzmu mere predostrožnosti i da se pripreme za puteve sa tzv. “uglačanom” površinom i veoma opasne uslove vožnje.

Analiza teksture površine izvršena je obradom slike dobijene iz video-sekvence. Sam algoritam je unapređen korelacionom analizom baziranom na skupu podataka o temperaturi putne površi, dobijenim u isto vreme kao i video-sekvenca, iz istog vozila u pokretu, uz georeferenciranje pomoću GPS-a.

Kao ulazne slike korišćeni su video-frejmovi. Izvršena je tehnika predobrade, zasnovana na opsecanju frejmova do odgovarajuće veličine i normalizacije nivoa sive boje.

Zatim su primenjene četiri metode ekstrakcije obeležja teksture: Gaborova transformacija; GLCM, EHD i WLT. Gaborova transformacija je bila najefikasnija. Ostale tri metode nisu pogodne za klasifikaciju tekstura korišćenih snimaka iz vozila u pokretu.

Tri različite metrike su upotrebljene za poređenje frejmova sa ciljem karakterizacije teksture: Euklidska udaljenost; Pirsonov (*Pearson*) koeficijent korelacije; i Normalizovane razlike srednjih vrednosti. Analiza korelacije i normalizovane razlike srednjih vrednosti po pojedinom frejmu i, u poređenju sa referentnim frejmom, omogućila je klasifikaciju površine puta u tri klase.

Dokazano je da je moguće analizirati teksturu dinamički snimljenih slika, uprkos smetnjama izazvanim kretanjem vozila. Takođe, dokazano je da se simultanim prikupljanjem slika i podataka o temperaturi, koji se odnose na iste merne tačke referencirane GPS koordinatama, mogu validirati klase teksture površine i da se može doprineti upravljanju klasifikacijom. Od velikog značaja je bilo poređenje predložene mape rizika na putu, bazirane na ovom algoritmu, sa realnom bazom podataka o saobraćajnim nezgodama izazvanim na putevima sa smanjenom otpornošću na proklizavanje, preuzetom od Agencije za bezbednost saobraćaja Srbije, a za istu deonicu puta na koju je algoritam i primenjen. Ovo je potvrdilo da su zone visokog rizika identifikovane predloženim algoritmom odgovarale delovima puta gde su se nesreće zaista desile. Stoga je moguće zaključiti da se razvijena metoda predviđanja rizika na putevima može koristiti za navigaciju, unos ulaznih podataka i podršku autonomnoj vožnji.

Kao podrška izboru alata za realizaciju navedenog algoritma putem obrade dvodimenzionalnog signala, prethodno je obavljena multifraktalna analiza jednodimenzionalnog signala dobijenog laserskim profilometrom sa vozila u pokretu. Statistička obrada ključnih parametara multifraktalnih spektara detektuje promene u makroteksturi, što dalje ukazuje na značajnu promenu kvaliteta površine puta.

Potvrđena je multifraktalna priroda uzoraka površine puta, a kroz ovakav pristup obradi signala dokazano je da je moguće realizovati automatizovan sistem za detekciju promena u sastavu i geometriji puta, iz vozila u pokretu, koji dalje može biti upotrebljen za konačnu klasifikaciju i kategorizaciju putne površi. Efikasnost klasifikacije može se povećati korišćenjem monohromatskih, koherentnih izvora sa manjim koracima profilisanja, što bi zatim dovelo do precizne lokalizacije diskontinuiteta nastalog usled promene teksture.

Stoga i multifraktalna analiza, kao alat ekspertskog sistema, može doprinieti efikasnosti i razvoju ekspertskog sistema za bezbednost saobraćaja, kao deo upravljanja putnom površinom.

Primećeno je da predložena metodologija za klasifikaciju površine puteva pokazuje veoma jasno grupisanje podataka. Ova činjenica se koristi za uvođenje klasifikacije koja obezbeđuje podelu profila makroteksture u osam odvojenih klasa. Rezultati predložene metodologije klasifikacije upoređeni su sa stanjem klasifikacije puteva na osnovu parametra IRI. Poređenje se vrši korišćenjem izmerenih vrednosti: makroteksture i IRI, u istom delu puta, u isto vreme.

Pokazano je da klasifikacija zasnovana na makroteksturi ima bolju rezoluciju, preciznija je, a samim tim ima i bolji uvid u kvalitet putne površine od IRI klasifikacije. Dobijeni rezultat R = 59,35% ukazuje na to da su, u slučaju visokih klasifikacionih poređenja, obe klasifikacije usklađene, a kandidat je predložio metodologiju za relevantnu klasifikaciju puta.

Ova disertacija predlaže mogućnosti upotrebe kamere u pokretu, kao korisne tehnike za analizu teksture površine puta, u slučaju da ne postoje očigledna vidljiva oštećenja kao što su pukotine, rupe i zakrpe, za analizu teksture površi koja sadrži različitu raspodelu i granulometriju agregata u površinskom sloju puta. Kategorizacija površine puta, pri različitim geometrijskim skalama, posebno podržana validacijom temperature, do sada nije istraživana na ovaj način. Ova metodologija kao jedan element dijagnostike sastava i geometrije puta najpre će pružiti podršku za dalji proces automatizacije u trenutno aktuelnoj vizuelno-manuelnoj oceni kvaliteta puteva.

Takođe, ovakav pristup i naučna osnova na kojoj je stvoren, pružiće kvalitetnu bazu za projektovanje nove putne infrastrukture, kao i za unapređenje programa za održavanje postojeće. Razvoj algoritama za predikciju i mapiranje rizičnih zona ili tačaka na kolovozu može doprineti razvoju ekspertskih sistema za preciznu klasifikaciju i kategorizaciju putne infrasrukture, što će direktno uticati na smanjenje broja saobraćajnih nezgoda, na generalno povećanje stepena bezbednosti svih učesnika u saobraćaju.

Literatura

[1] World Health Organization, *Global status report on road safety 2018*. WHO, France, 2018. ISBN 978-92-4-156568-4.

[2] World Health Organization, Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020. Dostupno na: https://www.- who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/plan_eng lish.pdf.

[3] Evropska direktiva 2008/96/EC o upravljanju infrastrukturom za bezbednost saobraćaja, 2008. Dostupno na: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0096.

[4] ISO 13473-1, 2019. Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of mean profile depth. Dostupno na: https://www.iso.org/standard/45111.html.

[5] Slavkovic N., Bjelica M. Risk prediction algorithm based on image texture extraction using mobile vehicle road scanning system as support for autonomous driving, Journal of Electronic Imaging, 28, 3, 033034, 2019. doi:10.1117/1.JEI.28.3.033034.

[6] World Health Organization, Trends in Reported Road Traffic Deaths, 2016. Dostupno na: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/301825/Serbia-GSRRS-2015-en.pdf?ua=1

[7] "Road risk mapping", The European Road Assessment Programme (EuroRAP 2008-2019), 2018. Dostupno na: http://www.eurorap.org/protocols/risk-mapping/

[8] "Road risk mapping design specification", The International Road Assessment Programme (iRAP) 2018. Dostupno na https://www.irap.org/2017/10/risk-mapping-design-specification/

[9] ASTM D6432-11. Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, 2011. Dostupno na: https://www.astm.org/Standards/D6432.htm.

[10] ASTM E1845-01. Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth, (Reapproved 2005), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005. https://www.astm.org/Standards/E1845.htm

[11] ISO 13473-2. Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis, 2002. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13473:-2:ed-1:v1:en

[12] Fugro: Fugro Roadware's Automatic Road Analyzer (ARAN) Dostupno na: http://www.roadware.com/products/survey_equipment/

[13] Bitelli, G., Simone A., Girardi F., Lantieri C. Laser scanning on road pavements: A new approach for characterizing surface texture. *Sensors*, 12, 7, 9110–9128, 2012. doi:10.3390/s120709110.

[14] Jungil Shin, Hyunsuk Park, and Taejung Kim, "Characteristics of Laser Backscattering Intensity to Detect Frozen and Wet Surfaces on Roads," *Journal of Sensors*, 2019, 8973248, 9 pages, 2019. doi:10.1155/2019/8973248.

[15] World Road Association. Road safety manual: a manual for practitioners and decision makers on implementing safe system infrastructure [Internet], Paris; 2015. Dostupno na:https://roadsafety.piarc.org/en

[16] Hoerner, T.E., Smith, K. D. *High performance concrete pavement: Pavement texturing and tire-pavement noise*. Federal Highway Administration, USA, Report No. FHWA-DTFH61-01-P-00290, 2002.

[17] Cairney P, *Skid Resistance and Crashes: a Review of the Literature Research*, Report No. 311, ARRB Transport Research Ltd, Vermont South Victoria, 1997.

[18] Widyatmoko D., Cossale, G., Elliott, R. The importance of Road Surface Texture in Active Safety Design and Assessment, *International Conference Road Safety and Simulation*, RSS2013, 22-25, Rim, Italija, 2013.

[19] Chu L., Fwa T., Ong G. Evaluating Hydroplaning Potential of Rutted Highway Pavements. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 1613-1622. 2015. doi:10.11175/easts.11.1613.

[20] Joop P. Pauwelussen, *Essentials of Vehicle Dynamics Chapter Two - Fundamentals of Tire Behavior*, Butterworth-Heinemann, 7-74, 2015. doi:10.1016/B978-0-08-100036-6.00002-9.

[21] Knutsson U. "Swedish national road and transport research institute. IATSS Research". 27. 2003. doi:10.1016/S0386-1112(14)60150-3.

[22] Kalra N., Paddock S. M., Driving to safety: *How many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability?* Transportation Research Part A: Policy and Practice, 94, 182-193, 2016. doi:10.1016/j.tra.2016.09.010.

[23] Cho H., Seo Y., Kumar B. V., R. R. Rajkumar A multi-sensor fusion system for moving object detection and tracking in urban driving environments, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, 1836-1843, 2014. doi:10.1109/ICRA.2014.6907100.

[24] Goodin, C.; Carruth, D.; Doude, M.; Hudson, C. Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS. *Electronics*, 8, 89, 2019. doi:10.3390/electronics8010089.

[25] Hasirlioglu S., Doric I., Lauerer C., Brandmeier T., Modeling and simulation of rain for the test of automotive sensor systems, 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Gothenburg, 2016, 286-291. 2016. doi:10.1109/IVS.2016.7535399.

[26] Tesla autonomous vehicle. Dostupno na: www.tesla.com i http://www.ccn.com/news/one-image-destroys-tesla-self-driving-car-fantasy/2019/07/14/ 2019.

[27] VOLVO autonomous driving. Dostupno na www.volvo.com i https://www.ien.com/product-development/news/21045930/autonomous-cars-arent-coming-anytime-soon-5-reasons

[28] Garisto D., First pedestrian death from a self-driving car fuels safety debate. The autonomous vehicle hit a woman crossing the street, *Science News*, March 19, 2018. Dostupno na: https://www.sciencenews.org/blog/science-ticker/first-pedestrian-death-self-driving-car-fuels-safety-debate

[29] Xu W., Pan J., Wei J, and Dolan J. M. Motion planning under uncertainty for on-road autonomous driving, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, 2507-2512, 2014. doi:10.1109/ICRA.2014.6907209.

[30] Chen X., Ma H., Wan J., Li B., Xia T., Multi-view 3D Object Detection Network for Autonomous Driving, *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, 6526-6534. 2017. doi:10.1109/CVPR.2017.691.

[31] ASTM E950 / E950M-09 (2018), Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer-Established Inertial Profiling Reference, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org

[32] ASTM E965-15, Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

[33] ASTM E2380 / E2380M-15, Standard Test Method for Measuring Pavement Texture Drainage Using an Outflow Meter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

[34] ASTM E1274-18, Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org

[35] ASTM E1911-19, Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
[36] ASTM E303-93(2018), Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
[37] ASTM E2157-15, Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Properties Using the Circular Track Meter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
[38] ASTM E1364-95 (2017), Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
[39] ISO 13473-3, Characterization of pavement texture by use of surface profilers- Part 3: Specification and classification of profilometers, :2002. Dostupno na: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13473:-3:ed-1:v1:en
[40] AASHTO TP81-10, Standard Method of Test for Determining Aggregate Shape Properties by Means of Digital Image Analysis. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. 2010.
[41] Ilkić D. *GIS portal infrastrukture* – JP "Putevi Srbije", Beograd, 2018.
[42] ASTM D3363-05, Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org.
[43] Gunaratne, M., Bandara, N., Medzorian, J., Chawla, M., and Ulrich, P. Correlation of tire wear and friction to texture of concrete pavements *J. Mater. Civ. Eng*., 12:1(46), 46–54, 2000.
[44] Miao Y., Cao D., and Liu Q. Relationship between surface macrotexture and skid resistance of asphalt pavement, *J. Beijing Univ. Technol*., 37 (04), 547–553, 2011.
[45] Zelelew, H. M., Papagiannakis, A.T., Izeppi, E.D. Pavement macrotexture analysis using wavelets, *International Journal of Pavement Engineering*, 14, 8, 725–735, 2013. doi:10.1080/10298436.2012.705004.
[46] Cafiso S., Taormina S. Texture analysis of aggregates for wearing courses in asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering* 8, 1, 45-54, 2007. doi:10.1080/10298430600898307.
[47] Erichsen, E. Relationship between PSV and in situ friction: A Norwegian case study. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 68, 339–343, 2009. doi:10.1007/s10064-009-0193-2.
[48] Smith, A.B.; Fu, C.N. Correlation of Laboratory and Field Friction Measurements to Optimize Utilization of Bituminous Surface Aggregates in Utah. *In Proceedings of the Transportation Research Board—94th Annual Meeting*, Washington, DC, USA; No. 15-4418. *Entropy*, 21, 208, 21-22. 2019.
[49] Y. Liu, T. Fwa, and Y. Choo, Effect of Surface Macrotexture on Skid Resistance Measurements by the British Pendulum Test. *Journal of Testing and Evaluation* 32, (4): 304-309. 2004. doi:10.1520/JTE11428.
[50] Ech M., Yotte S., Morel S., Breysse D., Pouteau B., Laboratory evaluation of pavement macrotexture durability, *Revue Européenne de Génie Civil*, 11:5, 643-662, 2007. doi:10.1080/17747120.2007.9692949
[51] Adams J. M., Richard Kim Y., Mean profile depth analysis of field and laboratory traffic-loaded chip seal surface treatments, *International Journal of Pavement Engineering*, 15, 7, 645-656, 2014. doi:10.1080/10298436.2013.851790.
[52] Iniewski, K. (Ed.) *Optical, Acoustic, Magnetic, and Mechanical Sensor Technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2012. doi:10.1201/b11487.
[53] Cairney P., Bennett, P. *An exploratory study of surface characteristics and crash occurrence on selected roads in Australia*, Research report ARR, 382, Vermont South, Vic.: ARRB Group Ltd, Sydney, 2013.

[54] Flintsch G.W., Leon E.D., McGhee K.K., Al-Qadi I. L. *Pavement Surface Macrotexture Measurement and Applications*, In Transportation Research Record No. 1860, *TRB*, National Research Council, Washington, D.C. 168-177, 2003.

[55] Díaz Vilariño L., Gonzalez H., Bueno M., Arias P., Puente I., Automatic classification of urban pavements using mobile LiDAR data and roughness descriptors. *Construction and Building Materials*, 102. 208-215. 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.199.

[56] Jog G.M., Koch C., Golparvar-Fard M., Brilakis I. A camera based ubiquitous pavement condition assessment framework, *Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 2011, Weimar, Germany.

[57] Schnebele, E., Tanyu, B.F., Cervone, G. et al. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment, *Eur. Transp. Res. Rev*. 7: 7. 2015. doi:10.1007/s12544-015-0156-6.

[58] Miao Y., Song P., Gong, X.. Fractal and Multifractal Characteristics of 3D Asphalt Pavement Macrotexture, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 8, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000912.

[59] Wang Y.; Yang Z.; Liu Y.; Sun L. The characterisation of three-dimensional texture morphology of pavement for describing pavement sliding resistance. *Road Mater. Pavement Des.* 2018. doi:10.1080/14680629.2018.1433710.

[60] Huang, C. *Mathematical Characterization of Road Surface Texture and Its relation to Laboratory Friction Measures*; Michigan Technological University: Houghton, MI, USA, 2002.

[61] Abbas, A.; Kutay, M.E.; Azari, H.; Rasmussen, R. Three-dimensional surface texture characterization of portland cement concrete pavements. *Computer Aided Civ. Infrastruct. Eng*., 22, 197–209, 2007. doi:10.1111/j.1467-8667.2007.00479.

[62] Edmondson V., Woodward J., Lim M., Kane M., Martin J., Shyha I. Improved non-contact 3D field and processing techniques to achieve macrotexture characterisation of pavements, *Construction and Building Materials*, 227, 116693, 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116693.

[63] Wen J. Study on Evaluating Texture Depth of Asphalt Pavement with Digital Technology. Master's Thesis, Chang'an University, Xi'an, China, 2009.

[64] Cackler, E.T.; Ferragut, T.; Harrington, D.S. Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods; National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University: Ames, IA, USA, 2006.

[65] Kogbara, R.B.; Masad, E.A.; Kassem, E.; Scarpas, A.; Anupam, K. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Constr. Build. Materials*, 114, 602–617, 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.

[66] Gendy, A.E.; Shalaby, A. Mean profile depth of pavement surface macrotexture using photometric stereo techniques. *J. Transp. Eng*. 133, 433–440, 2007. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X133:7(433).

[67] Andreou C., Karathanassi V., Kolokoussis P., Investigation of hyperspectral remote sensing for mapping asphalt road conditions, *International Journal of Remote Sensing*, 32:21, 6315-6333, 2011. doi:10.1080/01431161.2010.508799.

[68] Sengoz, B.; Topal, A.; Tanyel, S. Comparison of pavement surface texture determination by sand patch test and 3D laser scanning. *Period. Polytech. Civ. Eng*. 56, 73–78, 2012. doi:10.3311/ci.2012-1.08.

[69] Gabriele B.; Andrea S.; Fabrizio G.; Claudio, L. Laser scanning on road pavements: A new approach for characterizing surface texture. *Sensors* 12, 9110–9128, 2012. doi:10.3390/s120709110.

[70] Čelko, J.; Kováč, M.; Kotek, P. Analysis of the pavement surface texture by 3D scanner. *Transp. Res. Procedia*, 14, 2994–3003, 2016. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.434.

[71] Hu, L.; Yun, D.; Liu, Z.; Du, S.; Zhang, Z.; Bao, Y. Effect of three-dimensional macrotexture characteristics on dynamic frictional coefficient of asphalt pavement surface. *Construct. Build. Mater. 126*, 720–729, 2016.

[72] Wang, K.C.P.; Li, L. Pavement surface texture modeling using 1 mm 3D laser images. In *Proceedings of the Transportation Systems Workshop 2012*, Austin, TX, USA, 5–8 March 2012.

[73] Laurent J.; Hébert J.F., Lefebvre, D., Savard Y. Using 3D laser profiling sensors for the automated measurement of road surface conditions. *7th RILEM Int. Conf. Crack. Pavements, 4*, 157–167, 2012.

[74] Gendy, A. E., Shalaby, A. *Image requirements for three-dimensional measurements of pavement macrotexture*, Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 2068, 126–134, 2008

[75] Gendy, A. E., Shalaby, A. Mean profile depth of pavement surface macrotexture using photometric stereo techniques. *Journal of the Transportation Engineering*, 133:7(433), 433–440, 2007.

[76] Gendy, A.E.; Shalaby, A.; Saleh, M.; Flintsch, G.W. Stereo-vision applications to reconstruct the 3D texture of pavement surface. *Int. J. Pavement Eng*. 12, 263–273, 2011. doi:10.1080/10298436.2010.546858

[77] Wang K., Joshua L., Yang G., Zhan Y., Yanjun Q. Network level pavement evaluation with 1 mm 3D survey system. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition).* 2. 2015. doi:10.1016/j.jtte.2015.10.005.

[78] Meegoda, J.N., Gao S., Liu S., Gephart N., Pavement texture from high-speed laser for pavement management system, *International Journal of Pavement Engineering*, 14:8, 697-705, 2013. doi:10.1080/10298436.2012.655246.

[79] Meegoda, J.N., Shengyan G., Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2, (6), 382–390, 2015. doi:org/10.1016/j.jtte.2015.09.001.

[80] Miao Y., Wu J., & Hou Y.,Wang, L., Yu W., Wang S. Study on Asphalt Pavement Surface Texture Degradation Using 3-D Image Processing Techniques and Entropy Theory. *Entropy*. 21. 208. 2019. doi:10.3390/e21020208.

[81] Ravanshad, A., Roque, R., Tebaldi, G., Lopp, G., and Carpinone, P. Evaluation of Two-Dimensional Gray-Scale Images for Microtexture Analysis of Aggregate Surface, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04016044, 2016. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001520.

[82] Jog G.M., Koch C., Golparvar-Fard M., Brilakis I. Pothole properties measurement through visual 2D recognition and 3D reconstruction; *Proceedings of the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*; Clearwater Beach, FL, USA. 53–560, 2012.

[83] Praticò, F.G.; Vaiana, R. A study on the relationship between mean texture depth and mean profile depth of asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* 101, 72–79, 2015. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.021.

[84] PIARC. Technical Committee Report No 1: Surface Characteristics. In Proceedings of the XVIII World Road Congress, Brussels, Belgium, September 1987.

[85] Plati, C.; Pomoni, M.; Stergiou, T. Development of a Mean Profile Depth to Mean Texture Depth Shift Factor for Asphalt Pavements. *Transp. Res. Rec.* 2641, 156–163, 2017. doi:10.3141/2641-18.

[86] Araujo V. M. C., Bessa I.U., Castelo Branco V. T. F. Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS), *Construction and Building Materials*, Volume 98, 2015, Pages 476-481, doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.117.

[87] V. Kastrinaki, M. Zervakis, K. Kalaitzakis, A survey of video processing techniques for traffic applications, *Image and Vision Comp*., 21, 359-381, 2003. doi:10.1016/S0262-8856(03)00004-0

[88] Huidrom L., Das L.K., Sud S. K., Method for automated assessment of potholes, cracks and patches from road surface video clips, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*,. 104, 312–321, 2013. doi:10.1016/j.sbspro.2013.11.124.

[89] Prasanna P., Dana K., Gucunski N., Basily B. Computer-vision based crack detection and analysis, *SPIE smart structures and materials, nondestructive evaluation and health monitoring*, San Diego, CA, USA, 834542, 2012. doi:10.1117/12.915384.

[90] Gavilán M., Balcones D., Marcos O., Llorca D.F, Sotelo L., Parra I., Ocaña M., Aliseda P., Yarza P., Amírola A. Adaptive Road Crack Detection System by Pavement Classification, *Sensors*, 11(10), 9628-9657, 2011. doi:10.3390/s111009628.

[91] Wai Y. X., Yuan W., Yeung Y., Yuan X. X. A low-cost video-based pavement distress screening system for low-volume roads, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(5), 376-389, 2018. doi:10.1080/15472450.2017.1366320.

[92] Hadjidemetriou G., Christodoulou S. Entropy-Based Automatic Detection of Multiple Pavement Defects, *Conference: Transportation Research Board 97th Annual Meeting*, Washington DC, United States, 2018.

[93] Koch C., Jog G. M., Brilakis I., Automated pothole distress assessment using asphalt pavement video data, *Journal of Comp. in Civil Eng*., 27 (4), 370-378, 2013. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000232.

[94] Radopoulou S. C., Brilakis I. Patch detection for pavement assessment, *Automation in Construction*, 53, 95–104, 2015. doi:10.1016/j.autcon.2015.03.010.

[95] Jo Y., Ryu S. Pothole detection system using a blackbox camera, *Sensors*, 15, 29316–29331, 2015. doi:10.3390/ s151129316.

[96] Kokkalis, A. G., Panagouli, O. K. Fractal evaluation of pave- ment skid resistance variations. I: Surface wetting, *Chaos, Solitons Fractals*, 9, *11*, 1875–1890, 1998. doi:10.1016/S0960-0779(97)00138-0.

[97] Kokkalis, A. G., Panagouli, O. K. Fractal evaluation of pavement skid resistance variations. II: Surface wear, *Chaos, Solitons Fractals*, 9, *11*, 1891–1899, 1998. doi:10.1016/S0960-0779(98)00185-4.

[98] Hyslip J. P., Vallejo L. E. Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials, *Engineering Geology*, 48, (3), 231-244, 1997. doi:10.1016/S0013-7952(97)00046-X.

[99] Kwaśny, W. A modification of the method for determination of surface fractal dimension and multifractal analysis, *J. Achiev. Mater. Manufact. Eng*., 33, *2*, 115–125, 2009.

[100] Florindo J. B., Bruno O. M. Texture analysis by multi-resolution fractal descriptors, *Expert Systems with Applications*, 40, *10*, 4022-4028, 2013. doi:10.1016/j.eswa.2013.01.007.

[101] Miao Y.; Wang L.; Wang X.; Gong X. Characterizing Asphalt Pavement 3-D Macrotexture Using Features of Co-occurrence Matrix. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 8, 243–250, 2015. doi:10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(4).243.

[102] Miao Y.; Chen G.; Wang W.; Gong X. Application of gray-tone difference matrix-based features of pavement macrotexture in skid resistance evaluation. *J. Southeast Univ. Engl. Ed*., 31, 389–395, 2015. doi:10.3969/j.issn.1003-7985.2015.03.016.

[103] Jernigan, M.E.; D'astous, F. Entropy-based texture analysis in the spatial frequency domain. *IEEE Trans.Pattern Anal. Mach. Intell*. 2, 237–243, 1984. doi:10.1109/TPAMI.1984.4767507.

[104] Böhlke, T. Application of the maximum entropy method in texture analysis. *Comput. Mater. Sci*., 32, 276–283, 2005. doi:10.1016/j.commatsci.2004.09.041.
[105] Sun Q.; Huang Y.; Wang J.; Zhao S.; Zhang L.; Tang W.; Wu N. Applying CT texture analysis to determine the prognostic value of subsolid nodules detected during low-dose CT screening. *Clin. Radiol*. 2018. doi:10.1016/j.crad.2018.07.103.
[106] Gabor D., Theory of communication. Part 1: The analysis of information, *Journal of the Institution of Electrical Engineers – art III: Radio and Communication Engineering*, 93, *26*, 429, 1946. doi:10.1049/ji-3-2.1946.0074.
[107] Jain A. K., Farrokhnia F. Unsupervised texture segmentation using Gabor Filters, Pattern Recogn. 24, 12, 1167–1186, 1991. doi:10.1016/0031-3203(91)90143-S.
[108] Anbarjafari G., Izadpanahi S., Demirel H., Video resolution enhancement by using discrete and stationary wavelet transforms with illumination compensation, *Signal, Image and Video Processing*, 9, 87, 2015. doi:10.1007/s11760-012-0422-1.
[109] Gadelmawla E.S. A vision system for surface roughness characterization using the gray level co-occurrence matrix, *NDT & E International*, 37, *7*, 577-588, 2004. doi:10.1016/j.ndteint.2004.03.004.
[110] Manjunath B. S., Ohm J., Vasudevan V. V., Yamada A. Color and texture descriptors, in IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 11, no. 6, 703-715, 2001. doi:10.1109/76.927424.
[111] Deng, Y., Manjunath, B.S. Unsupervised segmentation of color-texture regions in images and video. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell.*, 23, *8*, 800-810. 2001. doi:10.1109/34.946985.
[112] Mallat S. A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation, *IEEE Trans. Pattern Recognit. and Machine Intell*. 11, 674–693, 1989. doi:10.1109/34.192463.
[113] Walenczykowska M., Kowalec A. Type of Modulation Indentification Using Wavelet Transform and Neural Network, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, Technical Sciences, 64, *1*, 257-261, 2016.
[114] Zalama E., Bermejo G. G., Medina. Liamas., R. J. Road crack detection using visual features extracted by Gabor filters, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29, 342–358, 2014. doi:10.1111/mice.12042.
[115] Campbell M., Haubold A., Ebadollahi S. et al., IBM Research TRECVID-2006 *Video Retrieval System*, NIST TRECVID Workshop, Gaithersburg, USA, 2006.
[116] Ekenel H. K., Fischer M., Gao H., Kilgour K., Marcos J. S., Stiefelhagen R. Universitat Karlsruhe (TH) at TRECVID 2007, *NIST TRECVID Workshop*, Gaithersburg, USA, Nov. 2007.
[117] Bovik A. C., Clark M., Geisler W. S., Multichannel texture analysis using localized spatial filters, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell*, 12, *1*, 55–73,1990. doi:10.1109/34.41384.
[118] Perona P. Deformable kernels for early vision, *IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell*. 1995, vol.17 (5), 488-499, 1995. doi:10.1109/34.391394.
[119] Clausi D. A., Jernigan M.E. Designing Gabor filters for optimal texture separability, *Pattern Recogn*, 33, 1835–1849, 2000. doi:10.1016/S0031-3203(99)00181-8.
[120] Lyons M., Budynek J., Plante A., Akamatsu S. Classifying Facial Attributes using A 2-d Gabor Wavelet Representation and Discriminant Analysis, *Proceedings of the 4th International conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, Grenoble, France, (Cat. No. PR00580), 202–207, 2000. doi:10.1109/AFGR.2000.840635.
[121] Sargano A., Angelov P., Habib Z. A Comprehensive Review on Handcrafted and Learning-Based Action Representation Approaches for Human Activity Recognition, *Appl. Sci.* **7**, (1), 110, 2017. doi:10.3390/app7010110.
[122] Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 3, 6, 610–621, 1973. doi:10.1109/TSMC.1973.4309314.

[123] Clausi D. A. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization, *Can. J. Remote Sens*., 28(1), 1–18, 2002. doi:10.5589/m02-004.

[124] Partio M., Cramariuc B., Gabbouj M., Visa A. Rock texture retrieval using gray level co-occurrence matrix, *Proc. 5th Nordic Signal Processing Symposium*, *NORSIG 2002*, Hurtigruten, Norway. 5, 2002.

[125] Manjunath B. S., Salembier P., Sikora T. *Introduction to MPEG 7: Multimedia Content Description Interface*, Wiley and sons, London, UK, 2002. ISBN: 978-0-471-48678-7.

[126] Ziari H., Barakoohi A. T., Moniri A. Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass, *Int. Journ. of Pavement Research and Tech.* 10, *4*, 297-303, 2017. doi:10.1016/j.ijprt.2017.04.006.

[127] Jahromi S. G., Mortazavi M.R., Voussough S., Yingjian L. Evaluation of pavement temperature on skid frictional of asphalt concrete surface, *Int. Journ. of Pavement Eng.*, 12, *1*, 47-58, 2010. doi:10.1080/10298436.2010.501864.

[128] Lazarev Y., Medres C., Raty J., Bondarenko A. Method of Assessment and Prediction of Temperature Conditions of Roadway Surfacing as a Factor of the Road Safety, *Transport. Research Procedia*, 20, 1*7*, 393-400, 2017. doi:10.1016/j.trpro.2017.01.064.

[129] Heriberto P. A.,Hernán G. O., Eduardo R. Skid resistance prediction for new two-lane roads, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 172, *5*, 264-273, 2019. doi:10.1680/jtran.17.00045.

[130] Henry, J.J. Evaluation of Pavement Friction of Characteristics; *Transportation Research Board*, National Research Council: Washington, DC, USA, 2000.

[131] Mandelbrot B. B. *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman and company, New York, 1977.

[132] Chhabra B. A., Meneveau C., Jensen V. R., Sreenivasan R. K. Direct determination of the f(α) singularity spectrum and its application to fully developed turbulence. *Physical Review A*, 40, *9*, 5284-5294, 1989. doi:10.1103/physreva.40.5284.

[133] Fouroutan-pour K., Dutilleul P., Smith D.L. Advances in the implementation of the box-counting methode of fractal dimension estimation, Applied Mathematics and computation, 105, 195-210, 1999. doi:10.1016/S0096-3003(98)10096-6.

[134] Landis, E. Damage variables based on three-dimensional measurements of crack geometry. *Strength, Fracture and Complexity*. 3, 163-173, 2005.

[135] Ayache A., Lévy Véhel J., On the identification of the pointwise Hölder exponent of the generalized multifractional Brownian motion, *Stochastic Processes and their Applications*, 111, *1*, 119-156, 2004. doi:10.1016/j.spa.2003.11.002.

[136] Gavrovska A., Zajic G., Reljin I., Reljin B. Classification of Prolapsed Mitral Valve versus Healthy Heart from Phonocardiograms by Multifractal Analysis. *Computational and mathematical methods in medicine*, 376152, 2013. doi:10.1155/2013/376152.

[137] Christophe C., L´evy V´ehel J., Tricot C. Continuous Large Deviation Multifractal Spectrum: Definition and Estimation. *M M Novak. Fractals 98*, Valleta, Malta. World Scientific 1998. Dostupno na: https://hal.inria.fr/inria-00592418/PDF/Continuous_Large_Deviation_Multifractal_Spectrum-_Definition_and_Estimation.pdf

[138] Larry L. Peterson, Bruce S. Davie, 2 - Getting Connected, Editor(s): Larry L. Peterson, Bruce S. Davie, *The Morgan Kaufmann Series in Networking, Computer Networks (Fifth Edition)*, 71-166, 2012. doi:10.1016/B978-0-12-385059-1.00002-8.

[139] ASTM E1082-90, Standard Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, https://www.astm.org/Standards/E1082.htm.

[140] Lu, D., Li G., Moran E., Dutra L., Batistella M. The roles of textural images in improving land-cover classification in the Brazilian Amazon, *Int. J. Remote Sens*. 35 *24*, 8188–8207, 2014. doi:10.1080/01431161.2014.980920.
[141] Road risk mapping, European Road Assessment Programme (EuroRap), Dostupno na: http://www.eurorap.org/protocols/risk-mapping/ 2018.
[142] Humeau-Heurtier A. Texture Feature Extraction Methods: A Survey. *IEEE Access*, 7, 8975-9000. 2019. doi:10.1109/ACCESS.2018.2890743.
[143] ISO/DIS 11819-2: 2012. Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close proximity method, Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.
[144] Jabben J.: Temperature effects on road traffic noise measurements, *Proc. of Internoise 2011*, 4-7 September, Osaka, Japan, 2011.
[145] Prażnowski, K., Mamala, J. Classification of the road surface condition on the basis of vibrations of the sprung mass in a passenger car. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 148. 2018. doi:10.1088/1757-899X/148/1/012022
[146] Gonzalez R.C, Woods R. E. *Digital Image Processing*, 3rd Ed. Prentice Hall, 2008.
[147] Weldon T. P., Higgins W. E., Dunn D.E., Efficient Gabor filter design for texture segmentation, *Pattern Recogniton*, 29, *12*, 2005-2015, 1996. doi:10.1016/S0031-3203(96)00047-7.
[148] Chen C. C., Chen D. C., Multiresolution Gabor filter in texture analysis, *Pattern Recognition Letters*, 17, *10*, 1069-1076, 1996. doi:10.1016/0167-8655(96)00065-7.
[149] Bodnarova A., Bennamoun M., Latham S., Optimal Gabor filters for textile flaw detection, Pattern Recognition, 35, 1*2*, 2973-2991, 2002. doi:org/10.1016/S0031-3203(02)00017-1.
[150] Tavsanoglu V., Saatci E. Feature Extraction for Character Recognition Using Gabor-type Filters Implemented by Cellular Neural Networks, *6th Proc. IEEE International Workshop on CNN and Their Application*, 63-68, 2000. doi:10.1109/CNNA.2000.876821.
[151] Yih-Ming S., and Jhing-Fa W., A novel stroke extraction method for Chinese characters using Gabor filters, Pattern Recognition, 36, *3*, 635-647, 2003. doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00086-9.
[152] Yang J., Liu L., Jiang T., Fan Y., A modified Gabor filter design method for finger-print image enhancement, Pattern Recognition Letters, 24(12), 1805-1817, 2003. doi:10.1016/S0167-8655(03)00005-9.
[153] Lee C. Wang S., Wu K. Fingerprint Recognition Using Principal Gabor Basis Function, Proc. of International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Proceeding, 393-396, 2001. doi:10.1109/ISIMP.2001.925416.
[154] Liu C., Wechsler H. Independent Component Analysis of Gabor Features for Face Recognition, IEEE Trans. on Neural Networks, 14(4), 919-928, 2003.
[155] Lampinen J., Erkki O. Distortion Tolerant Pattern Recognition Based on Self-Organizing Feature Extraction, IEEE Trans. on Neural Networks, 6(3), 539-547, 1995.
[156] Namuduri K.R, Mehrotra R, and Ranganathan N, Edge detection models based on Gabor filters, IEEE 11th IAPR International Conf. On Speech and Signal Analysis Proceedings, 729-732, 1992.
[157] Daugman J.G, Complete Discrete 2-D Gabor Transforms by Neural Networks for Image Analysis and Compression, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 36(7), 1169-1179, 1988.
[158] Weldon T.P,. Higgins W.E., Dunn D.F. Gabor filter design for multiple texture segmentation, *Optical Engineering* 35, *10*, 1996, doi:org/10.1117/1.600971

[159] Beaulieu N. C., Hemachandra K.T. Novel Representations for the Bivariate Rician Distribution, *IEEE Transactions on Communications*, 59, 2951-2954, 2011.

[160] Manjunath B. S., Ma W. Y. Texture features for browsing and retrieval of image data, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*. 18, *8*, 837–842, 1996.

[161] Pramestya R.H, Sulistyaningrum D.R, Setiyono B, Mukhlash I and Firdaus Z, Road Defect Classification Using Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) and Radial Basis Function (RBF), *10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Kuta, 285-289, 2018. doi:10.1109/ICITEED.2018.8534769.

[162] Park D. K., Yoon S. J., Chee S. W. Efficient use of local edge histogram descriptor. *ACM Multimedia Workshops*, 2000. doi:10.1145/357744.357758.

[163] Sheng Y, *Wavelet transform*. Poularikas AD (ed) *The transforms and applications handbook*, 2nd edn. CRC Press LLC, Boca Raton, 2000.

[164] Wu K, Yang M. Mean shift-based clustering, *Pattern Recognition*, 40, *11*, 3035-3052, ISSN 0031-3203, 2007. doi:org/10.1016/j.patcog.2007.02.006.

[165] Slavkovic N, Zajic G, Gavrovska A, Reljin I.S, Reljin B.D, Bjelica M. Integrating Mobile Vehicle Sensor Diagnostic Procedures into the Intelligent Transportation Network, *14th Symposium on Neural Network Applications in Electrical Engineering (NEUREL)*, Belgrade, Serbia, 2018. doi:10.1109/NEUREL.2018.8586998

[166] Road Traffic Safety Agency, Republic of Serbia, Brochure – Integrated Database about Traffic Safety Features in Republic of Serbia, 2017. Dostupno na: http://www.abs.gov.rs/admin/upload/documents/20171219103755-brosura_web_gis_2016.pdf,

[167] Dandala T.T, Krishnamurthy V, Alwan R, Internet of Vehicles (IoV) for traffic management, 2017 International Conference on Computer, Communication and Signal Processing (ICCCSP), 2017. doi:10.1109/ICCCSP.2017.7944096.

[168] Al Dhahri S, Al Sieairi S, Al Marashda H, Meribout M,.A real-time perception system for autonomous cars targeting highways, Proc. SPIE 10752, Applications of Digital Image Processing XLI, 107521B, 2018. doi:10.1117/12.2326775.

Biografija autora

Nikola Slavković je rođen 23.06.1969. godine u Beogradu. Završio je osnovnu školu „N.H. Branko Parać“ i Matematičku gimnaziju u Beogradu. Nosilac Vukove diplome, uspešno učestvovao na mnogim takmičenjima iz fizike i matematike. Diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na odseku Fizička elektronika i smeru Medicinska i nuklearna tehnika. Magistrirao na Elektrotehničkom falultetu u Beogradu 2005. sa temom „Optimizacija primene lasera male snage u biomedicini“, kod prof. dr Milese Srećković.

Od 1999-2001. godine radio u preduzeću „Centrolek“ u Beogradu, kao rukovodilac tehničke podrške za uređaje za biohemijsku analizu. Sarađivao na ETF-u na predmetu Fizika 1, i povremeno, na predmetima čije su nastavne oblasti laseri, njihova primena i optički prenos signala. Od 2000. godine, radi u Srednjoj tehničkoj PTT školi, kao nastavnik elektrotehničke grupe predmeta. Od 2002. godine do danas zaposlen u Visokoj školi strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije u Beogradu, u zvanju predavača. Predaje telekomunikacione predmete, na osnovnim i specijalističkim studijama. Šef je specijalističkog studijskog programa „Elektronske komunikacije“ na Visokoj ICT školi. Pored nastavnih obaveza trenutno je i na poziciji pomoćnika direktora.

Više puta bio član stručne komisije za ocenjivanje naučnoistraživačkih radova na regionalnim nacionalnim i međunarodnim takmičenja i smotrama. Učestvovao u većem broju izrada Glavnih elektrotehničkih projekata telekomunikacionih mreža i sistema. Učestvovao na sledećim obukama i stekao odgovarajuće sertifikate:

- Licenca: ***Odgovorni projektant telekomunikacionih mreža i sistema***, Inženjerske komore Srbije, 2007. godine.

- Licenca: ***Odgovorni izvođač radova telekomunikacionih mreža i sistema***, Inženjerske komore Srbije, 2007. godine.

- Licenca: ***Odgovorni projektant el. energ. instalacija niskog i srednjeg napona***, Ministarstva gradjevine saobraćaja i infrastrukture RS, 2019.

- Licenca: ***Odgovorni izvođač radova el. energ. instalacija niskog i srednjeg napona***, Ministarstva gradjevine saobraćaja i infrastrukture RS, 2019.

- Završio obuku „Intermediate approved installer for LANscape solutions- copper“ i „Intermediate approved installer for LANscape solutions- fiber optics“, u kompaniji Corning Cable Systems, Germany Neustadt u Nemačkoj, 2006. godine.

Član domaćih društava: Inžererska komora Srbije, FTTH udruženje Srbije, ETRAN i Telekomunikacije.

Angažovan je kao stalni član komisija za polaganje stručnog ispita iz oblasti elektrotehničke struke, od strane Inženjerske komore Srbije i kao stalni član komisija za dodelu licenci iz oblasti elektrotehničke struke, od strane Ministarstva građevine, saobraćaja i infrastrukture.

Do sada je objavio dva rada u istaknutim mađunarodnim časopisima sa SCI liste, i oko 40 naučnih i stručnih radova u međunarodnim i nacoinalnim naučnim časopisima i konferencijama.

Aktivno se služi engleskim i ruskim jezikom.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Никола Славковић

Број уписа 956

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Детекција промене састава и геометрије пута обрадом измерених параметара за потребе категоризације путне инфраструктуре

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 04.12.'19

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Никола Славковић

Број уписа 956

Студијски програм Телекомуникације

Наслов рада Детекција промене састава и геометрије пута обрадом измерених параметара за потребе категоризације путне инфраструктуре

Ментор: проф. др Милан Бјелица

Потписани: Никола Славковић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 04.12.19

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Детекција промене састава и геометрије пута обрадом измерених параметара за потребе категоризације путне инфраструктуре

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе 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 прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 04.12.'19