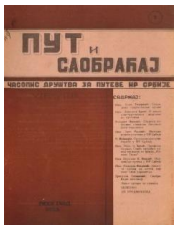
СРПСКО ДРУШТВО ЗА ПУТЕВЕ

Пут и саобраћај
Journal of Road and Traffic Engineering

www.putisaobracaj.rs



Crowdsensing – нови приступ за оцену квалитета путева

Ивана Грујић[a], Маријана Петровић[a], Наташа Бојковић[a]

[a] *Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет*

ПОДАЦИ О РАДУ

DOI: 10.31075/PIS.67.01.03
Стручни рад
Примљен:02/02/2021
Прихваћен:15/03/2021
Аутор за кореспонденцију:
ivanagrujic@hotmail.com
Кључне речи:

Crowdsourcing
Crowdsensing
Паметни телефони
Вибрације на путу

РЕЗИМЕ

Континуирани развој информационих и телекомуникационих технологија довео је до могућности преноса података и информација између људи у реалном времену, за свега неколико секунди, што је довело до појаве нових приступа у прикупљању података. Један од њих је утемељен у концептуп*crowdsourcing* (умрежена маса људи) који подразумева прикупљање велике количине дефинисаних података од великог броја (масе) људи путем интернета, односно уграђених сензора у паметним уређајима. То су најчешће мобилни телефони и тада говоримо о концепту *mobile crowdsourcing* – који је шире прихваћен под појмом *crowdsensing*. У овом раду је приказано како се путем паметних уређаја (мобилних телефона или таблета) могу прикупити подаци о вибрацијама које са јављају током вожње у друмском саобраћају – и даље искористити за детекцију неправилности на путној инфраструктури (ударне рупе на путу, избочине, улегнућа и сл.) у реалним условима.

1. УВОД

Најновији талас развоја информационо-комуникационих технологија, познат под акронимом IoT (енгл. *Internet of Things*) –"интернет ствари", подразумева умрежене уређаје и објекте (попут мобилних телефона, аутомобила, електроенергетскиих мрежа и др.) који поседују сензоре за прикупљање података из окружења.. Када је реч о паметним мобилним телефонима, захваљујући унапређеним технолошким карактеристикама могуће је прикупити одређене податке о кориснику, као што је на пример његова локација. Одређене апликације у паметним мобилним телефонима омогућавају повезивање и интеракцију са другим корисницима. Како би се то повезивање велике масе корисника искористило са сврхом решавања одређених проблема у друштву, развијене су мобилне апликације у различитим областима примене. Тако је на пример, у области саобраћаја, Mercedes-Benz развио комуникациони систем за размену информација о стању на путевима између возила. Те информације се односе на потенцијалне опасности које неко возило детектује, као што су саобраћајне незгоде, радови на путу, временски услови и сл. Технологија размене информација између возила на бази мобилне комуникације има сврху да упозори возаче на предстојеће опасности, у раној фази.

Са сличном идејом, развијене су мобилне апликације за мерење вибрација на путу како би се установиле ударне рупе, избочине, улегнућа и сл. као проблеми са којима се возачи сусрећу током вожње. У питању је *crowdsensing* систем као вид *crowdsourcing*-а, који на основу сензора у паметном мобилном телефону може да детектује вибрације током вожње и на основу тога изврши идентификацију стања на путу, што представља тему овог рада.

У овом раду је дат приказ концепта квалитета путева, његове методе мерења и оцене. Такође, дат је теоријски приказ *crowdsourcing*-а и објашњен модел мерења вибрација током вожње ради прикупљања података о квалитету путева у реалним условима. Циљ рада је да детаљно објасни *crowdsourcing* и његов аспект *crowdsensing*, њихову улогу и значај у одржавању путева.

Рад је тако организован да се у наредном поглављу најпре дефинише концепт, методе мерења и оцене квалитета путева. Друго поглавље дефинише појам и концептуални модел *crowdsourcing*-а. Треће поглавље објашњава примену *crowdsensing* система за оцену стања путева у пракси и оно се бави алгоритмом прикупљања и обраде података.

Четврто поглавље говори о изазовима примене *crowdsensing* концепта за мерење квалитета пута. У закључку рада су сумиране предности и изазови примене овог приступа оцени стања путева.

2. КВАЛИТЕТ ПУТЕВА – КОНЦЕПТ, МЕТОДЕ МЕРЕЊА И ОЦЕНЕ

Иако у литератури није пронађена тачна дефиниција квалитета путева, можемо се позвати на општу дефиницију квалитета која по стандарду ISO 9000:2000 гласи да је квалитет "способност скупа својствених карактеристика производа, система или процеса да испуњава захтеве корисника и других интересних група" [1].

Уколико би на основу ове дефиниције квалитета могао да се дефинише квалитет путева, могло би се рећи да квалитет путева представља способност скупа својствених карактеристика да испуњава услове за кретањем друмских возила.[2]

Под својственим карактеристикама квалитета путева се подразумева: адекватна изградња прописаних димензија путева; дуготрајност и постојаност квалитета коловозног застора који је отпоран на хабање и временске услове; адекватна хоризонтална и вертикална сигнализација; адекватно постављен инвентар на путу (банкине, заштитне ограде и сл.).[2]

У највећем броју случајева прво оштећење асфалтног застора је пукотина. Протоком времена и деловањем воде која првобитно испуњава пукотину, долази до слабљења коловозне конструкције и настајања нових пукотина, њиховог отварања, омогућавања продирања воде и даљег слабљења носивости које води до потпуног слома коловозне конструкције.[3]

Како би се одржавао задовољавајући квалитет путева, неопходно је спровођење одржавања путева које је од изузетног значаја за друштво као систем који свакодневно функционише.

Неадекватно одржавање путева не само да може изазвати саобраћајну незгоду и оштећење на возилу већ може негативно утицати на психичко стање људи, јер утиче на стрес, буку и незадовољство, повећавајући време путовања током свакодневних активности. Такође, лоша путна инфраструктура одражава се на процесе у друштву као што је транспорт робе или путника, где може довести до оштећења робе и неудобности путника у вожњи.

2.1. Методе мерења и прикупљања података – осврт на традиционални приступ

Прикупљање података о путној инфраструктури традиционалним приступом изискује велике трошкове. На пример, годишњи трошкови прикупљања података о оштећењима путева у САД-у износе 1,4 милиона долара.[1] Ако анализирамо неопходне услове за спровођење испитивања стања путне инфраструктуре, треба имати у виду:

- специјализовану опрему, уређаје и наменска возила која се користе;
- квалификовани кадар која ће знати и умети да рукује датом опремом и уређајима;
- време које је потребно за спровођење испитивања;
- квалификовани кадар и време које је потребно за обраду података.

Овакав приступ, као процес може трајати дужи временски период који је неопходно понављати. Стога се не може рећи да је традиционална технологија економски исплатива.

Оцена стања путева добија се мерењем стања деонице којим се прикупљају подаци о: саобраћају, слојевима, тлу, прегледности, равности, трењу, одржавању и носивости.[4] Транспортни одсек Светске банке за Источну Азију са партнерима, израдио је документ у којем даје приказ доступних технологија за испитивање стања на путу и путног инвентара. Типична опрема која се користи за физичка испитивања површине пута подразумева: ласере, уређаје за мерење угиба, динамичку и статичку опрему. Сврха ове белешке је да помогне другим земљама у успостављању одрживог програма прикупљања података.[5]

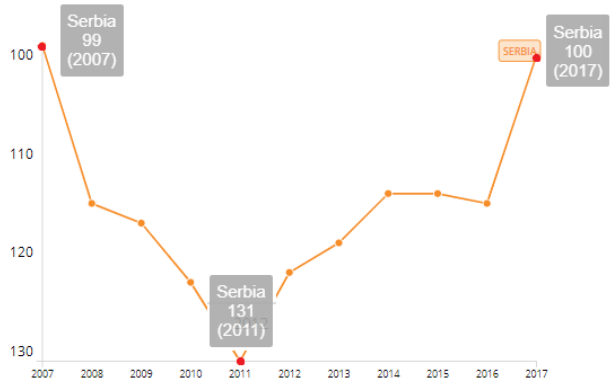
Поред физичких испитивања, оцена може бити заснована и на анкетама корисника. Пример је индикатор квалитета путева који користи Светски економски форум – WEF (енгл. *World Economic Forum*) у оквиру Индекса глобалне конкурентности. Поред WEF-а, овај показатељ у оквиру својих база и портала користе и Светска Банка (енгл. *The World Bank*) [2] и Скорборд Европске Уније у области транспорта.[3] Вредност се добија на основу одговора на питање "Који је квалитет (опсежност и стање) путне инфраструктуре у вашој земљи?", а понуђени одговори су на скали од 1 – 7 (где 1 значи међу најгорима на свету, а 7 међу најбољима на свету) [6]. Подаци се публикују у форми ранг листе уз могућност визуелизације на националном нивоу (приказ за Србију дат је на Слици 1.)

[1] податак преузет са: *https://eandt.theiet.org/content/articles/2020/10/crowdsourced-data-from-motorists-could-help-expedite-road-repairs/*

[2] https://tcdata360.worldbank.org/indicators/haa1ef7dc

[3] https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/investments-infrastructure/quality-roads_en

Србија се по квалитету путне инфраструктуре у 2017. години на светској листи нашла на 100. месту са оценом 3,2.[4]



Слика 1. Позиција Србије на светској листи квалитета путева за период од 2007.-2017. године *Извор: (The World Bank)*

Клопфенстеин и сарадници [7] објашњавају да управљање путном инфраструктуром захтева редовна испитивања путева и редовне активности праћења и одржавања. То су углавном скупи, дуги и често неефикасни процеси који обично обухватају визуелне провере од стране стручњака и употребу посебно опремљених возила, где се испитивања фокусирају на карактеристике као што су равност коловозне површине (попречна или подужна), оштећења коловозне површине (ударне рупе, пукотине, улегнућа) и интеракција возило – пут (однос дубине текстуре и оствареног трења између коловозног застора и пнеуматика).[7]

Прегледом различитих приступа може се закључити да централни елемент оцене квалитета путева чини оцена стања коловоза.

2.2. Оцена стања коловоза

Када је реч о методама мерења квалитета путева неопходно је разграничити неколико појмова. Према иницијативи Светске банке, уведен је у употребу **индекс за оцену равности – IRI** (енгл. *International Roughness Index*). Опрема за мерење равности по принципу реакције на неравнине бележи динамичко понашање механичког система у вожњи при константној брзини (најчешће 50 km/h). Резултат таквог мерења је акумулисање свих угиба механичког система на посматраној деоници, који се потом поделе са дужином деонице и добије се вредност IRI-ја изражена у јединицама нагиба (m/km). IRI представља репрезентативни параметар за оцену равности и утиче на комфор вожње, оперативне трошкове возила и безбедност.[8] Из искуства САД-а, аутори Цветановић и Банић [4] у својој књизи дају препоруку за вредности IRI-ја са гледишта стања коловоза које су усвојене у држави Монтани, као нама најприближнијој по климатским условима (Табела 1.).[4]

Табела 1. Вредности индекса IRI

Оцена	Асфалтни коловоз	Бетонски коловоз
врло добар	0 – 71	0 – 134
добар	72 – 111	135 – 174
средњи	112 – 158	175 – 221
лош	159 – 213	222 – 226
врло лош	> 213	> 276

Извор: (Цветановић А. и Банић Б. 2007.)

Индекс стања коловоза – PCI (енгл. *Pavement Condition Index*) чији је прорачун заснован на визуелном опажању типа, нивоа и степена оштећености коловоза, треба да укаже на стање коловозне конструкције и услове за одвијање саобраћаја.[8] Овај индекс је базиран на америчком стандарду ASTM D6433 (енгл. *American Society for Testing Materials*), усвојен од стране Америчког удружења за јавне радове – APWA (енгл. *American Public Works Association*).[9]

Оцена стања коловоза – PCR (енгл. *Pavement Condition Rating*) добија се регресионим поступком развијеним у држави Вашингтон:[10]

$$PCR = C - m \cdot A^p \qquad (1)$$

где је:

PCR – оцена стања коловоза (на скали од 0 до 100)

C = 100

m – коефицијент положаја линије

A – старост коловоза у годинама

p – константа облика линије

Неке локалне заједнице су развиле сопствене приручнике и упутства за процену карактеристика коловоза па је тако развијен **PASER** (енгл. *Pavement Surface Evaluation and Rating*) – систем за оцену коловозне површине заснован на визуелној процени. PASER представља приручник Транспортног информативног центра у Висконсину који је намењен да помогне локалним званичницима да разумеју и оцене стање коловозне површине. Он описује врсте оштећења и пружа једноставан систем за визуелно оцењивање стања пута.[11] Систем визуелне процене функционише тако што се стање пута на терену упоређује са примерима стања пута у приручнику. Након констатовања врсте и степена оштећења на путу, пут се оцењује на скали од 1 до 10 (где 1 представља најгоре а 10 одлично стање).

[4]податак преузет са:https://tcdata360.worldbank.org/indicators/haa1ef7dc?country= SRB&indicator=538&viz=line_chart&years=2007,2017&indicators=944

3. CROWDSOURCING – МОДЕЛ И СРОДНИ КОЦЕПТИ

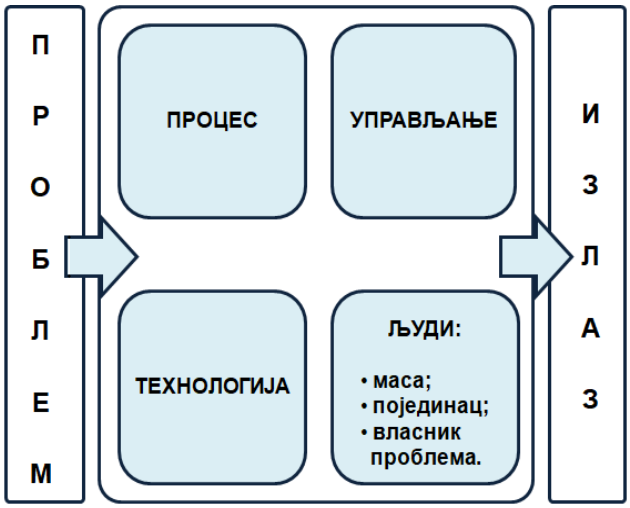
У литератури се може наћи неколико дефиниција појма *crowdsourcing*. Израз *crowdsourcing* настао је комбинацијом енглеских речи "*crowd*" (маса, велика група људи) и "*outsourcing*" (коришћење услуга/ресурса других компанија), и дефинише расподелу задатака међу групом људи. Сам концепт је настао у *offline* контексту али његова шира примена и популаризација је везана за коришћење интернета и персоналних паметних уређаја (пре свега мобилних телефона). Коришћење интернета олакшава примену *crowdsourcing*-а јер омогућава приступ великој маси људи широм света у кратком временском року и по нижим трошковима.[12] *Crowdsourcing* представља модел сарадње, односно колаборативни модел путем веб технологија где динамички формирана група људи решава индивидуалне, организационе и друштвене проблеме, прихватајући отворен позив за учешће. Модел *crowdsourcing*-а заправо представља коришћење колективне мудрости велике масе људи (енгл. *wisdom of the crowd*) како би се пронашло што боље решење за одређени проблем.[13]

Crowdsourcing се разликује од обичног *outsourcing*-а, јер се посао додељује непознатој групи људи, у облику отвореног јавног позива, а не специфичној групи стручњака за одређену област. Јавни позив може бити циљан, када је неопходан минималан ниво стручности за неку активност, или отворен за целокупну јавност. Посао углавном није плаћен јер у њему учествују волонтери, који својим појединачним радом решавају проблем ради општег добра, односно доприноса друштву и заједници. У неким случајевима, њима могу бити додељене одређене награде, признања или гласачка права.[14]

3.1. Концептуални модел *crowdsourcing*-а

Педерсен и сарадници [13] објашњавају да су на основу истраживања о развоју концептуалног приступа и оквира *crowdsourcing*-а, развили концептуални модел *crowdsourcing*-а који је приказан на Слици 2. Овај модел је заснован на IPO (енгл. *Input-Process-Output)* моделу. Инпут се односи на проблем који треба да се реши *crowdsourcing*-ом, *crowdsourcing* процес подразумева скуп елемената (процес, технологија, управљање и људе) за решавање проблема, док се аутпут односно излаз односи на решење проблема као резултат *crowdsourcing*-а.[13]

У концептуалном моделу *crowdsourcing*-а проблем представља изјаву о почетном стању и његове карактеристике одређују захтеве везане за све остале елементе. Процес представља скуп активности свих актера у *crowdsourcing* процесу како би се решио проблем.[13]



Слика 2. Концептуални модел *crowdsourcing*-а
Извор: (Педерсен и сарадници, 2013.)

Технологија подразумева техничке могућности односно хардверску и софтверску подршку сталној интеракцији и крајњем решењу проблема. Управљање се односи на механизме усмеравања масе ка жељеном циљу, јер неконтролисана маса не може достићи крајњи циљ. Маса представља динамички формирану групу појединаца која учествује у *crowdsourcing*-у. Власник проблема представља иницијатора односно државну агенцију, компанију или појединца коме је потребно решење проблема. Он има потпуну контролу над целим *crowdsourcing* пројектом. На крају, излаз представља исход односно резултат *crowdsourcing* процеса који може бити чињенични (резултат који је створила маса) и перцептивни (субјективни однос власника проблема и учесника према резултату).[13]

Постоји неколико појмова [2] који су у вези са термином *crowdsourcing*, а који су настали од речи *crowd*. Један од њих је *crowdsensing*.

Crowdsensing користи предности мобилних телефона тако што прикупља податке из окружења путем уграђених сензора као што су: GPS (енгл. *Global Positioning System*) пријемник, акцелерометар, жироскоп, камера, микрофон, бежична мрежа и др. Оперативни систем у мобилном телефону омогућава апликацијама приступ сензорима и извлачење необрађених сензорских података.[15]

4. CROWDSENSING У ДРУМСКОМ САОБРАЋАЈУ И ТРАНСПОРТУ

Crowdsourcing има велики потенцијал примене у друмском саобраћају и транспорту јер може да прикупи просторне и временске податке преко мобилних апликација велике масе корисника (заједнице) у току коришћења транспортних услуга.

Али пошто се ти подаци добијају путем сензора а не путем размене идеја и мишљења између људи, у питању је *crowdsensing*. *Crowdsensing* функционише тако што паметни уређаји на основу уграђеног GPS пријемника и акцелерометра прикупљају податке у простору и времену након чега се обрађују, анализирају и примењују у одређеном пољу истраживања.

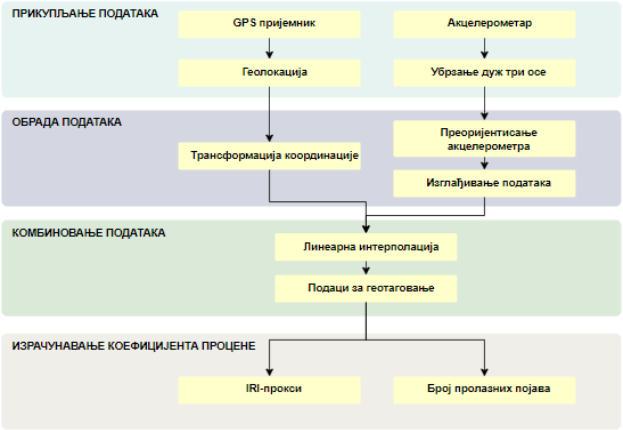
Области примене *crowdsensing* система у друмском саобраћају и транспорту којима се баве одређене студије су: мерење вибро удобности током вожње ради испитивања задовољства корисника [16,17], мерење саобраћајног загушења на основу прикупљених података о брзини саобраћаја [18], безбедност бициклистичког саобраћаја [19], праћење возила у саобраћају [20], откривање грешака возача у вожњи [21] и др.

Посебно поље примене *crowdsensing*-а које је у фокусу овог рада је идентификовање проблема путне инфраструктуре као што су ударне рупе, избочине, улегнућа, пукотине и неравнине на путу. Детектовање ових оштећења је веома важно јер стање путне инфраструктуре утиче на безбедност у саобраћају, психо-физичке тегобе код возача, удобност у вожњи, стање возила и квалитет саме вожње.

4.1. *Crowdsensing* за оцену стања путева

У овом раду биће приказан алгоритам система података о вибрацијама на основу анализираних студија које се баве *crowdsensing* системом за праћење стања на путу. Студије се изводе на основу мобилне апликације на паметном мобилном телефону са Android или iOS оперативним системом или путем неких других паметних уређаја. Подаци се прикупљају путем уграђеног GPS пријемника и акцелерометра. Уређај је неопходно држачем фиксирати у аутомобилу са унутрашње стране ветробранског стакла или на неком другом месту.

Уколико је у питању мобилни телефон, пре покретања возила, возач треба да активира претходно инсталирану апликацију на паметном мобилном телефону. Током вожње, апликација прикупља податке о стању коловоза и отпрема их на интернет сервер – *cloud*, који их складишти. Неке од апликација које се користе за мерење равности путева су *Roadroid*, *RoadBump*, *SmartRoadSense*, итд. Циљ ових студија је пројектовање *crowdsensing* система који ће детектовати проблеме на путу како би градским властима донео уштеде у времену, раду и трошковима, и омогућио ефикасно праћење стања на путу.



Слика 3. Алгоритам система података заснован на коришћењу паметног мобилног телефона
Извор: (Li & Goldberg, 2018.)

На Слици 3. приказан је алгоритам система података применом паметног мобилног телефона који су предложили Ли и Голдберг а који се састоји од четири корака: прикупљање података, обрада података, комбиновање података и прорачун коефицијента процене.

4.2. Прикупљање података (*crowdsensing* приступ)

У студији коју су спровели Ли и Голдберг [22] у америчкој држави Тексас, подаци се прикупљају на основу акцелерометра и GPS пријемника паметних мобилних телефона. Акцелерометри у паметним мобилним телефонима представљају осетљиве сензоре који имају велику брзину узорковања података што омогућује детекцију потреса на друмском возилу, када возило пређе преко ударне рупе или избочине (пролазне појаве).

Како би се направила разлика између убрзања која су изазвана пролазном појавом и уобичајеног убрзања/успорења возила, акцелерометар се треба преоријентисати тако да се оса мобилног телефона поравна са осом возила, односно да X и Y оса мобилног телефона директно сензорски очитавају хоризонтално убрзање/успорење возила.

Сврха преоријентације акцелерометра је коришћење убрзања дуж Z осе које је управно на возило, и које се користи за идентификацију убрзања изазваних вибрацијама возила. Уколико је овај услов задовољен, може се рећи да је акцелерометар правилно оријентисан, док је у супротном дезоријентисан.[22]

Дакле оријентација подразумева да X оса представља правац кретања возила, Y оса бочни правац а Z оса је вертикална односно управна на правац кретања возила.

У студији Ел-Вакела и сарадника [23] спроведеној у Канади, анализиране су врсте коловозне површине и неправилности на њима, као и њихов утицај на возило у покрету. Подаци су такође прикупљени путем акцелерометра и GPS пријемника паметних мобилних телефона и једног таблет уређаја који су били причвршћени за наслон за руке, ветробранско стакло и држач за чашу. У овом истраживању су коришћене различите врсте возила (два комбија, две лимузине, два крос-овера (енгл. *cross-over*), један мини-вен (енгл. *mini-van*) и један хечбек (енгл. *hatchback*)), различитих димензија, различитог квалитета система за ослањање и различитих година производње, како би се обухватио што већи опсег података. Имајући у виду оштећења приказана на Слици 4. као што су ударне рупе, попречне или подужне пукотине, улегнућа, раздвајање асфалта, шахтови, лежећи полицајци, дренажни канали, дилатациони спојеви и др., Ел-Вакел и сарадници [23] су усвојили класификатор који је у стању да детектује и класификује различите типове оштећења.[23]

У студији коју су спровели Чен и сарадници [24] у Кини, коришћен је CRSM (скраћеница од енгл. *crowdsourcing mointoring*) систем, односно систем који се састоји од бежично повезаних хардверских модула који користе GPS пријемнике и акцелерометре за детекцију ударних рупа на коловозу и процену стања коловозне површине. Овај модул користи податке из груписаног сензорског очитавања о вибрацијама на путу, локацији и брзини возила. CRSM систем обухвата алгоритам за прикупљање података базиран на мешовитом Гаусовом моделу – GMM (енгл. *Gaussian Mixture Model*), и алгоритам за класификацију ударних рупа и избочина на путу.

Слика 4. Различити типови оштећења на путу

Сваки хардверски уређај који је уграђен у возилу састоји се од микроконтролера – MCU (енгл. *Micro-Controller Unit*), GPS пријемника, акцелерометра у три осе и GSM модула (енгл. *Global System for Mobile Communications*). Када се возило креће, акцелерометар очитава непрекидне податке о убрзању, GPS пријемник даје тачно време, локацију и брзину возила, MCU извршава алгоритме како би се екстраховали подаци, а GSM модул шаље резултате у централни сервер.[24]

4.3. Обрада и комбиновање података

У студији Лија и Голдберга [22] за обраду података примењује се нископропусни и високопропусни филтер како би се екстраховали сигнали убрзања генерисани неравнинама и избочинама на путу, на мерења убрзања дуж Z осе. Акцелерометри мере одређену силу односно убрзање у односу на слободан пад. Нископропусни филтер се користи за екстракцију силе земљине теже из измереног убрзања. Затим се примењује високопропусни филтер како би се елиминисао утицај силе земљине теже ради добијања усклађеног убрзања. Нископропусни филтер се примењује у следећем облику:[22]

$$Y_n = \alpha \cdot Y_n - 1 + (1 - \alpha) \cdot X_n \quad (2)$$

$$\alpha = 1 + \frac{t}{t + dT} \quad (3)$$

где је:

α – коефицијент описа детекције сензора
Y_n – тренутни филтрирани излаз
t – временска ознака
dT – стопа сигнализирања појаве
X_n – тренутно опажање

Након примене нископропусног филтера, за елиминисање утицаја силе земљине теже примењује се високопропусни филтер:[22]

$$Z_n = X_n - Y_n = \alpha \cdot X_n - \alpha \cdot Y_{n-1} \quad (4)$$

где је:

Z_n – усклађено убрзање
Y_{n-1} – филтрирани излаз из последњег периода

Стопа ажурирања излазног сигнала код уграђеног GPS пријемника (обично 1 Hz) далеко је нижа него код уграђеног акцелерометра (обично 100 Hz). За георeференцирање сваког мерења акцелерометром, примењује се шема линеарне екстраполације уз претпоставку да се друмско возило креће константном брзином између две суседне GPS позиције. За израчунавање размака између две суседне GPS позиције, почетне геодетске координате се трансформишу у ECEF (енгл. *earth-centered, earth-fixed*) координате (центриране на земљи, фиксиране на земљи) које

представљају координате у Декартовом координатном систему. Због кратког временског интервала од 1 s између две тачке GPS узорка, претпоставља се да су брзине компоненти дуж ECEF координата константне, на основу чега се могу применити следеће једначине за процену координата измерених вредности путем акцелерометра узоркованих у тренутку t:[22]

$$x = x_0 - \frac{(t-t_0)(x_1-x_0)}{t_1-t_0} \quad (5)$$

$$y = y_0 - \frac{(t-t_0)(y_1-y_0)}{t_1-t_0} \quad (6)$$

$$z = z_0 - \frac{(t-t_0)(z_1-z_0)}{t_1-t_0} \quad (7)$$

где су:
(x_0, y_0, z_0) и (x_1, y_1, z_1) – координате две узастопне GPS локације узроковане у тренутку t_0 и t_1 респективно
Помоћу координата (x, y, z) може се путем акцелерометра георeференцирати свака измерена вредност узрокована на путевима. Растојање између тачке узроковања акцелерометром и прве GPS локације (x_0, y_0, z_0) тада се може проценити применом следеће једначине:[22]

$$S = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (8)$$

где је:

S – растојање између две тачке

Такође, Ли и Голдберг [25] су у својој новој студији предложили побољшано решење мобилног *crowdsensing*-а за откривање аномалија на путу, користећи приступ континуиране таласне трансформације – CWT (енгл. *Continuous Wavelet Transform*) и метод просторног груписања. Њихов првобитни приступ заснован на прагу детекције открива аномалије на путевима екстракцијом вредности из сигнала убрзања дуж Z осе. Нови приступ подразумева да се сензорски обрађени сигнали анализирају континуираном таласном транцформацијом да би се идентификовала оштећења на путу и процениле њихове величине:[25]

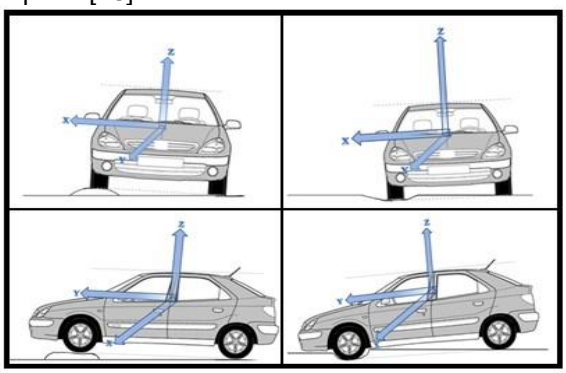
$$C(a,\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{a} \varphi^* \left(\frac{x-\tau}{a}\right) dx \quad (9)$$

где је:
C – излазни таласни коефицијент
$f(x)$ – унапред обрађени улазни сигнал у функцији локације (x)
a – параметар скале (обрнуто повезан са просторном фреквенцијом)
τ – параметар положаја
φ^* – коњуговано комплексни број матичне таласне функције који је изабран на основу карактеристике која нас занима

Затим се мобилни сензорски сигнали анализирају континуираном таласном трансформацијом да би се идентификовала оштећења на путу и процениле њихове величине. Даље, иновативно се користи метода просторног груписања резултата у кластере на основу њихових образаца просторне густине. Коначно, оптимизовани резултати откривања добијају се синтезом тачака чланова сваког кластера. Аутори наводе да су резултати показали да таласна анализа има супериорну способност анализирања сигнала који се непрекидно мењају, што показује велики потенцијал да помогне у тумачењу сензорских података, међутим интегрисање таласне трансформације у детекцију аномалија на путу још је у премилинарној фази. Аутори објашњавају да је већина постојећих студија усредсређена на идентификовање и проналажење ударне рупе (оштећења) међутим, да мали број студија истражује како проценити величину ударних рупа помоћу мобилних података, са обзиром на то да се штете изазване ударним рупама разликују се у зависности од њихове величине.[25]

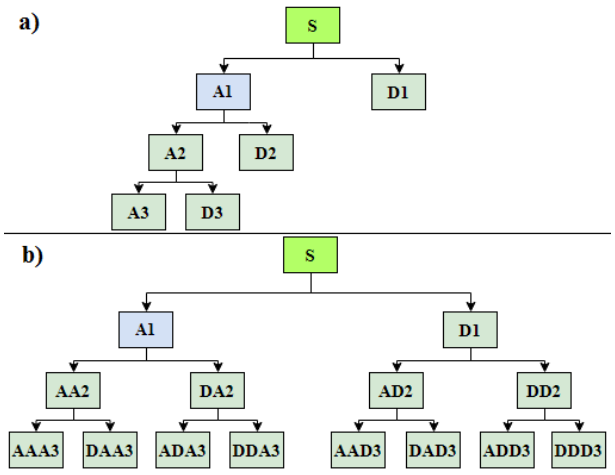
Такође, постоје неке техничке препреке које ограничавају примену *crowdsensing* решења у садашњој фази. На пример, прикупљање података путем мобилног *crowdsensing*-а је ограничено хардверским карактеристикама паметних мобилних телефона. Подаци прикупљени путем неквалитетних мобилних сензора могу довести до непоузданих резултата. Прикупљање података великом брзином узорковања може испразнити батерију телефона за неколико сати или чак брже. Такође, на прецизност података могу утицати модел мобилног телефона, врста возила, вештине возача у вожњи и сл.[25]

У студији Ел-Вакела и сарадника [23] развијена је метода елиминисања шума из сигнала и усвојен је класификатор који је у стању да детектује и класификује различите типове оштећења на путевима. Када су у питању ефекти оштећења на кретање возила, према њиховој природи догађаји на путу се могу поделити на оне у којима возило учествује точковима само са једне стране и оне у којима возило учествује точковима са обе стране.[23]



Слика 5. Ефекти догађаја на путу на кретање возила
Извор: (El-Wakeel et al., 2018)

На Слици 5. приказани су ефекти догађаја на путу на кретање возила. У одређеним условима, возило може учествовати у догађају на путу само једним точком приликом скретања. Сензорски очитани подаци су добијени од инерцијалних мерних уређаја – IMU (енгл. *Inertial Measurement Units*), и ти подаци показују уобичајену динамику кретања возила, утицаје оштећења на путевима и шум. Код IMU-ова постоје различити извори шума. Шум IMU-ова се може поделити на дуготрајне грешке (оне са нискофреквентним компонентама) и краткотрајне грешке (оне са високофреквентним компонентама).[23] Једна од тривијалних техника елеминације шума је Фуријеова трансформација, међутим њена основна мана је што се након трансформације фреквенцијског домена губе све важне информације из временског домена, па је у складу са тим предложена дискретна Фуријеова трансформација по временским прозорима – WDFT (енгл. *Windowed Discrete Time Fourier Transform*) како би се превазишао недостатак временске локализације (који се јавља код обичне Фуријеове трансформације). Међутим, код WDFT-а се поред одређених недостатака може јавити феномен "спектрално цурење", као када се моделира фреквенција која не садржи цео број периода при посматраној дужини, па се енергија расипа на остале фреквенције.[26] Како би се превазишли изазови WDFT-а, у овој студији су предложени и усвојени таласићи (енгл. *wavelets*). Код таласића, анализа омогућује употребу релативно дугих временских прозора код којих су потребне нискофреквентне компоненте. У међувремену, када је потребан високофреквентни садржај, усвајају се краћи интервали. Као последица тога, процесом мултирезолуционе анализе таласића (енгл. *Wavelet Multi-Resolution Analysis*), сигнал се раздваја на више резолуционих нивоа као што је приказано на Слици 6. (а).[27,28,29]



Слика 6. Стабло раздвајања таласића и пакети таласића
Извор: (извор: El-Wakeel et al., 2018.)

Како би се превазишли изазови елиминације шума таласића, Ел-Вакел и сарадници [23] су у њиховој анализи усвојили процедуру елиминације шума таласића применом пакета таласића. Пакети таласића, као што је приказано на Слици 6. (б), се примењују у почетном кораку разлагања у којем се сигнал раздваја на апроксимацију (A) и детаље (D).[29,30]

Аутори су у оквиру приступа елиминисања шума применили Bi-ортогоналну анализу елиминације шума применом пакета таласића. Анализа користи основне пакете таласићи, а који могу разложити фреквенцијску осу на подељене слотове различитих величина који се могу преносити у времену како би покрили целу раван време – фреквенција. Као и сваки простор, V_j се може поделити на подпросторе за апроксимацију, V_{j-1} и детаље W_{j-1} где је:[23]

$$V_j = V_{j-1} + W_{j-1} \tag{10}$$

Елиминација шума применом пакета таласића у овој студији побољшала је квалитет сензорских мерења како би се омогућила ефикасна класификација оштећења коловозне површине. Аутори су применили статистичке показатеље временског и фреквенцијског домена како би усвојили класификатор за детектовање и категорисање различитих типова оштећења која су приказане у Табели 2.[23]

Табела 2. Категорија типова оштећења на путу

Тип пута/оштећење
1. лош пут
2. мала рупа
3. велика рупа
4. мали шахт
5. велики шахт
6. попречна пукотина
7. подужна пукотина
8. мало улегнуће
9. велико улегнуће
10. саобраћајне траке за успорење
11. лежећи полицајци
12. мали пружни прелаз
13. велики пружни прелаз
14. калдрма

Извор: (El-Wakeel et al., 2018.)

Поред овога, аутори су интегрисали решење за позиционирање путем GPS пријемника и обезбедили робусно георeференцирање оштећења на путу чак и у окружењу са непотпуном покривеношћу GPS-ом.[23]

У студији коју су спровели Чен и сарадници [24], CRSM систем селективно пријављује корисне податке централном серверу одбацивањем података о убрзању са равних путева, без ударних рупа и избочина. Акцелерометар може очитавати вибрације возила праћењем убрзања дуж Z осе. Углавном су вибрације на проблематичним деоницама пута веће него на равним путевима, тако да нагло повећање убрзања дуж Z осе представља ударну рупу. Детекција убрзања врши се путем алгоритма на бази GMM-а. Међутим, алгоритам на бази GMM-а има два недостатка. Први недостатак је фиксни гранични праг детекције појаве. На вибрације возила утиче брзина вожње, што значи да ће током вожње при већој брзини возило вибрирати и тада ће акцелерометар генерисати већу амплитуду вибрација и тиме узроковати лажну узбуну. Са друге стране, мала брзина доводи до непријављивања појава када се примени фиксни гранични праг за детекцију. Други недостатак је фиксна брзина учења. Алгоритам на бази GMM-а користи фиксну брзину учења за ажурирање средње вредности, одступања и тежинског фактора сваке Гаусове расподеле поистовећујући сигнале и информације из прошлости са тренутним стањем. Међутим то не важи када се брзина возила промени, односно уколико дође до повећања брзине, убрзање дуж Z осе се такође мења што представља разлику између повећаног убрзања и претходног убрзања из прошлости. Ови недостаци су решени унапређеним алгоритмом, код којег се гранични праг за детекцију појава мења као параметар који је оквирно у линеарном односу са тренутном брзином, и ажурирана је брзина учења.[24]

Централни сервер CRSM система прикупља, пречишћава и обједињује податке о појавама. Код филтрирања података о ударним рупама, примењују се четири филтера за уклањање пролазних појава:[24]

- **филтер брзине** – уклања појаве са нултом или веома малом брзином; одбацује појаве чија је брзина мања од вредности дефинисаног граничног прага;

- **филтер убрзања дуж Z осе** – елиминише појаве са ниским максимумом убрзања дуж Z осе, попут малих ударних рупа; одбацује појаве чије је убрзање дуж Z осе мање од вредности дефинисаног граничног прага;

- **филтер односа између убрзања дуж X и Z осе** – брише појаве са малим односом између убрзања дуж X осе и убрзања дуж Z осе, као што су дилатациони или контракциони спојеви, попут кретања возила на мосту; одбацује појаве чији је однос између убрзања дуж X осе и убрзања дуж Z осе мањи од вредности дефинисаног граничног прага;

- **филтер односа између брзине и убрзања дуж Z осе** – елиминише појаве са великим односом између брзине и убрзања дуж Z осе, који је углавном изазван вибрацијама услед велике брзине; одбацује појаве чији је однос између брзине и убрзања дуж Z осе већи од вредности дефинисаног граничног прага.

Након филтрирања података о ударним рупама, централни сервер прикупља резултате детекције ударних рупа а затим пребројава колико пута је пријављена свака потенцијална ударна рупа. На крају, потврђује ударну рупу када је број пријављивања већи од дефинисаног граничног прага, док у супротном, обележава ударну рупу као лажну узбуну.[24]

Откривање оштећења на путној инфраструктури је од суштинског значаја за одржавање путева а мобилни *crowdsensing* може представљати јефтино решење за реализацију. Управо због тога, мобилни *crowdsensing* је истраживачко питање којима се многи аутори баве. Студије на тему мобилног *crowdsensing*-а које су обрађене у овом раду имају одређене сличности и разлике. Оно што је заједничко за све студије јесте да су у свим студијама за прикупљање података коришћени паметни мобилни телефони или неки други паметни уређаји (таблет и др.). GPS пријемник и акцелерометар поседују сви паметни уређаји и то чини њихову предност коју свако може искористи. Када се прикупе подаци, следи њихова обрада. У студијама Ли и Голдберг [22] и Чен и сарадници [24] сензорски прикупљени подаци су обрађени путем дефинисаног прага детекције док су у студијама Ли и Голдберг [25] и Ел-Вакел и сарадници [23] сензорски подаци обрађени на бази приступа таласне анализе. У свим студијама аутори наводе да су добијени резултати углавном поуздани али у студији Ли и Голдберг [25] аутори објашњавају да су резултати добијени применом таласне анализе показали висок степен тачности и поузданости. У студијама Ли и Голдберг [25] и Ел-Вакел и сарадници [23] није био само акценат на откривању оштећења на путу већ и на дефинисању типа оштећења. Након обраде прикупљених података следи оптимизација резултата и поређење са вредностима IRI-ја, како би се оценио квалитет путева. Сви аутори су сагласни да на прецизност добијених података може утицати употреба различитих паметних уређаја, ограничена прецизност GPS-а, вожња по истим рутама, начин вожње возача и сл.

5. ИЗАЗОВИ ШИРЕ ПРИМЕНЕ CROWDSENSING КОНЦЕПТА ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА ПУТЕВА

Анализиране студије су потврдиле могућност примене *crowdsensing* система у пракси са ограниченим ресурсима. Међутим, уколико би дошло до реализације *crowdsensing* система у реалним условима, јавили би се одређени изазови који су везани за прецизност података. Чен и сарадници [24] у својој студији наводе да се детекција пролазних појава ослања искључиво на тачку приањања, односно тачку контакта пнеуматика и подлоге – што значи да на резултате може утицати врста возила (да ли је путничко или теретно) са аспекта ширине пнеуматика који приања на коловоз. Такође, сам стил вожње може утицати на добијање података. Један возач може тежити избегавању ударних рупа током вожње док други може прелазити преко њих. Са друге стране, неопходно је утврдити број пролазака возила тест рутом како би се добили валидни резултати, односно како би се филтрирали подаци и одбацили они који представљају лажну узбуну. Један од проблема који може да се јави је прецизност GPS пријемника. У студији Ел-Вакела и сарадника [23] у којој су коришћени паметни мобилни телефони и таблет уређај, добијени су различити резултати о позиционирању возила, што указује на потребу за уређајима за интегрисано позиционирање ради постизања одговарајућег нивоа прецизности.

Поред GPS прецизности, велики проблем и уједно ограничење представља калибрација паметних уређаја. Код употребе паметних уређаја, потребна је калибрација са другим уређајем, калибрисаним за мерење равности а затим прорачунати коефицијенте корекције. Такође, квалитет добијених података зависи од квалитета сензора односно паметних мобилних телефона. У овом контексту, Ли и Голдбер [25] сугеришу да је квалитет сензора на савременим возилима далеко већи и да они сакупљају хиљаде сигнала путем технологије магистралне мреже на подручју контролера CAN (енгл. *Control Area Network*), која може у реалном времену надгледати возило и околно окружење. Стога, сензори на возилу имају већу брзину узорковања и бољи квалитет података од паметног телефона, што омогућава постизање прецизнијег резултата. Дакле, могуће су разлике у подацима добијених од различитих возила на путу па је неопходно сагледати ширу слику и размотрити различите утицаје на резултате и најбоља решења.

Поред примарне намене *crowdsensing* система која подразумева утврђивање стања на путу, могу се искористити и друге предности овог система, а везане су за саобраћај на путу. Па тако на пример, уколико би се догодила лакша саобраћајна незгода на путу, квар на возилу или нека опасност на путу, возило би могло одмах да се лоцира преко GPS-а. Ово би захтевало модификације у самој апликацији, рецимо да се уведе одређени тастер (енгл. *button*) који треба возач да активира, или да активира случајни возач који се затекао на месту незгоде. А уколико је у питању тешка саобраћајна незгода, модификација у софтверу која би омогућила да систем може да детектује незгоду на основу јачине и типа вибрација које ће се разликовати од стандардних вибрација на путу које се јављају преласком преко рупа.

Crowdsensing подаци о квалитету путева могу бити допуна подацима које прикупљају неке друге технологије, на пример REM (енгл. *Road Experience Management*). REM представља технологију која прикупља податке из окружења путем сензора, радара, камера и скенирањем (енгл. *LiDAR*). Ови подаци служе за креирање мапе путева којом ће се кретати аутономна возила. Ова технологија може да детектује друга возила, саобраћајне знакове и рупе на путу што директно условљава кретање возила по креираној мапи. На бази податка добијених од сензора, видимо да REM технологија иде корак даље и користи добијене податке за креирање мапе путева са циљем да допринесе развоју ”паметних градова” (енгл. *Smart Cities*). Шире гледано, развој технологије тежи ка електронском концепту окружења почевши од паметних уређаја, паметних зграда, паметних улица па до аутономних возила. *Crowdsensing* подаци о вибрацијама и типу рупе на путу могу бити подршка у смислу потврде детекције REM система али и валидирања *crowdsensing* података. Предуслов овоме је шира комерцијализација оба приступа, и оног који користи REM и оног који је базиран на *crowdsensing*-у.

За разлику од традиционалног приступа оцени квалитета који изискује велике трошкове (Поглавље 2. овог рада), примена *crowdsensing* приступа подразумева само трошкове обраде података. Да би спровели *crowdsensing* систем у реалним условима, специјализована опрема, уређаји и возила нису потребна. Податке прикупљају корисници путем својих мобилних телефона који већ поседују и свакодневно користе. Прикупљање података се врши аутоматски од стране уграђених сензора мобилног телефона а не од корисника, тако да посебно знање и умеће није потребно. Иако је већ речено да квалитет сензора мобилних телефона утиче на квалитет прикупљених података, што већи број људи учествује у *crowdsourcing*-у, то ће се више поспешити тачност и квалитет података. За прикупљање података потребно је одређено време које се може назвати “иницијално време“ – време које је потребно да би се прикупили подаци на почетку примене *crowdsensing* система. Након прикупљања почетних података, база података ће се аутоматски ажурирати на дневном нивоу и публиковати у форми *online* мапе – увид у стварно стање у датом тренутку што представља суштинску

разлику у односу на периодично време трајања испитивања у традиционалном приступу. Након прикупљања података, неопходан је квалификовани кадар за обраду података и одређено време за обраду. Време за обраду података ће директно условљавати време за које ће се санирати оштећење на путу али пошто се стање на путу свакодневно ажурира, то време ће бити мање од времена које је потребно у традиционалном приступу.

Овакав систем константног прикупљања података пружиће подршку у одлучивању о деоницама приоритетним за санацију. На основу анализе традиционалног и *crowdsensing* приступа, може се рећи да је *crowdsensing* приступ економичнији и мултифункционалнији.

Поред изазова везаних за сам процес прикупљања и обраде података, посебно питање од интереса је приватност података у процесу *crowdsourcing*-а. Подаци који су прикупљени од учесника у *crowdsourcing*-у могу садржати осетљиве информације као што су идентитет, биометријски подаци, подаци о локацији и сл. На пример, информације о локацији се лако могу добити путем GPS пријемника који је уграђен у мобилном телефону. Неки подаци о животној средини као што су прецизна температура ваздуха, светлост, бука и сл., такође могу открити информације о локацији. Откривање информација о локацији као што су локација код куће или на радном месту стварају информације о рутини кретања које могу угрозити приватност учесника у *crowdsourcing*-у.[31]

6. ЗАКЉУЧАК

У раду је анализиран приступ у прикупљању података – *crowdsourcing*, са фокусом на *crowdsensing* систем за прикупљање податкао квалитету путева. *Crowdsensing* представља нов приступ у детекцији оштећења на путевима путем паметних уређаја и води ка смањењу потреба за испитивањима на самим локацијама (деоницама), и последично ка уштедама у времену и трошковима. Константно ажурирање података у реалном времену, довешће до брже интервенције а самим тим спречавање проширења аномалије на путу и већу штету.

У поређењу са користима које могу да се остваре, имплементација *crowdsensing* система за почетак може представљати релативно јефтино решење, базирано на ангажману друштвене заједнице. Поред управљача инфраструктуром и предузећа за одржавање путева, друштвена заједница такође може искористити предности овог система.

Из перспективе појединачних корисника, квалитетнији путеви поред удобније и безбедније вожње, утичу и на очување њихових возила, уколико користе приватни аутомобил за кретање или квалитет њиховог путовања уколико користе возила јавног градског превоза.

Свеукупно гледано, *crowdsensing* систем доноси корист за друштво у целини јер својим предностима олакшава кретање возила, функционисање саобраћајног система и повећава квалитет живота у заједници. Међутим, примена овог система у реалним условима наилази на одређене изазове. Три кључна изазова у *crowdsensing*-у су тачност података, довољан број потврда за идентификацију оштећења на путу и стил вожње возача. Прецизност података се у будућности може решити прикупљањем путем сензора на комерцијалним возилима, у односу на досадашње прикупљање путем сензора на паметним уређајима. Решење за друга два изазова може бити повезано, јер ако у вожњи један број возача тежи ка избегавању ударних рупа на путу а други број не, то значи да је потребно да што већи број возача (маса) учествује у *crowdsensing*-у. Тачније, вероватноћа да ће велики број возача прелазити преко ударне рупе је већа уколико је велика и маса људи која учествује, што ће даље условити већи број потврда за неку ударну рупу. Концепт *crowdsensing* као идеја има добру основу али у зависности од начина на који ће ови изазови бити превазиђени, зависиће и коначни учинак његове примене.

Crowdsensing– a new approach to road quality assessment

Ivana Grujić[a], Marijana Petrović[a], Nataša Bojković[a]

[a] *University of Belgrade – Faculty of Transport and Traffic Engineering*

Abstract: The continuous development of information and telecommunication technologies has led to the possibility of transferring data and information between people in real time, in just a few seconds, which has led to the emergence of new approaches to data collection. An example is crowdsourcing (networked mass of people), which involves collecting a large amount of defined data from a large number (mass) of people through the Internet, that is, embedded sensors in smart devices. These are most often mobile phones and then it is about the concept of mobile crowdsourcing – which is more widely accepted under the term crowdsensing. This paper shows how smart devices (mobile phones or tablets) can collect vibration data that occur while driving in road traffic – and still be used to detect irregularities in road infrastructure (potholes, bumps, etc.) in real conditions.

Key words: *crowdsourcing, crowdsensing, smartphones, vibrations on road*

Литература

[1] ISO 9000: 2000, Системи менаџмента квалитетом – Основе и речник, Институт за стандардизацију Србије.

[2] Грујић И. (2020), "*CROWDSENSING ЗА ОЦЕНУ КВАЛИТЕТА ПУТЕВА*", мастер рад, Саобраћајни факултет, Београд.

[3] Цветановић А. и Банић Б. (2011), "*Поправке коловозних конструкција*", Академска мисао, Београд.

[4] Цветановић А. и Банић Б. (2007), "*Коловозне конструкције*", Академска мисао, Београд.

[5] Bennett C., de Solminihac H. & Chamorro A. (2006), "*Data Collection Technologies for Road Management*", Transport Note No. 30, pp. 01-08. ROADS AND RURAL TRANSPORT THEMATIC GROUP, THE WORLD BANK, WASHINGTON, DC.

[6] The World Bank, Data/TCdata360/Indicator, Преузето са: http://reports.weforum.org/global-competitiveness-index-2017-2018/competitiveness-rankings/#series=EOSQ057 (датум приступа: 01.08.2020.).

[7] Klopfenstein L., Delpriori S, Polidori P, Sergiacomi A., Marcozzi M., Boardman D, Parfitt P. & Bogliolo A. (2019), "Mobile crowdsensing for road sustainability: exploitability of publicly-sourced data", *International Review of Applied Economics*, pp. 650–671.

[8] Цветановић А. и Банић Б. (2013), "*Локални путеви*", Академска мисао, Београд.

[9] Binnie D., Francoforte R., Loo S. & Shah R. (2016), "*PCI/IRI/PCR: Formulas to Combine ro Rate an Uraban Street Network*", Презентација са: 2016. ESRI User Conference. Преузето са: https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc16/papers/117_35.pdf (датум приступа: 11.09.2020.).

[10] Jackson N. and J. Mahoney, "Washington State Pavement Management System", Federal Hwy. Admin. Text for Advanced Course on Pavement Management, Nov. 1990.

[11] Transportation Information Center, Home/Documents Page/Road Maintenance and rehabilitation /PASER Manual: Asphalt (PubPas01), Преузето од веб-сајта: https://epd.wisc.edu/tic/documents/paser-manual-asphalt-pubpas01/ (датум приступа: 03.08.2020.).

[12] Llorente R., Morant M. & Garrigos-Simon F. J. (2015). "Crowdlearning, Applying Social Collaboration in Higher Education". Рад представљен на International Conference – New perspectives in science education. pp. 256-260.

[13] Pedersen J., Kocsis D., Tripathi A., Tarrell A., Weerakoon A., Tahmasbi N., Xiong J., Deng W., Oh O. & deVreede, G-J. (2013). "Conceptual Foundations of Crowdsourcing: A Review of IS Research", 46th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 579-588.

[14] Ињац-Малбаша В. (2013), "Crowdsourcing – одређење појма, типологија и сродни термини", Гласник Народне библиотеке Србије, 2012/2013, pp. 239-255.

[15] Ganti R., Ye F. and Lei H. (2011). "Mobile Crowdsensing: Current State and Future Challenges", IEEE Communications Magazine, pp. 32-39.

[16] Баљак Л., Филиповић Ф., Јездић И. & Лабус А. (2019). "A system for Crowdsensing Vibration Comfort in Smart Traffic"

[17] Баљак Л., Бојковић, Н., Лабус, А., Наумовић, Т. & Максимовић, А. (2019). "A system for mobile crowdsensing vibration in public transportation", 2019 International Conference on Artificial Intelligence, Врдник, pp. 26-30.

[18] Nair D., Gilles F., Chand S., Saxena N. & Dixit V. (2019). "Characterizing multicity urban traffic conditions using crowdsourced data", University of Washington, Plos One, pp. 1-16.

[19] Saad M., Abdel-Aty M., Lee J. & Cai Q. (2019). "Bicycle Safety Analysis at Intersections from Crowdsourced Data", National Academy of Sciences: Transportation Research Board 2019, pp. 1-14.

[20] Metlo S., Memon M., Shaikh F., Ali Teevno M. & Talpur A. (2019). "Crowdsource Based Vehicle Tracking System", Wireless Personal Communications, pp. 1-19.

[21]Li X., Goldberg D., Chu T. & Ma A. (2019), "Enhancing driving safety: Discovering individualized hazardous driving scenes using GIS and mobile sensing", *Transactions in GIS*, pp. 538–557.

[22] Li X. & Goldberg D. (2018), "Toward a mobile crowdswnsing system for road surface assessment", Computers, Enviroments and Urban Systems 69, pp. 51-62.

[23] El-Wakeel A., Li J., Noureldin A, Hassanein H. & Zorba N. (2018), "Towards a Practical Crowdsensing System for Road Surface Conditions Monitoring", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 5, No. 6, pp. 4672-4685.

[24] Chen K., Lu M., Tan G. & Wu J. (2013), "CRSM: Crowdsourcing based Road Surface Monitoring", Рад представљен на 2013 IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embudded and Ubiquitous Computing, pp. 2151-2158.

[25] Li X. & Goldberg D. (2019), "Embracing Crowdsensing: An Enhanced Mobile Sensing Solution for Road Anomaly Detection", *International Journal of Geo-Information*, pp. 01-21.

[26] Sanjit M., "*Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*", 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

[27] W. Abd-Elhamid, A. Osman, and A. Noureldin (2005), "Wavelet Multi-resolution analysis for enhancing the performance of integrated GPS and MEMS-based navigation system," *Geomatica*, Vol. 59, No. 1, pp. 61-72.

[28] E. I. Laftchiev, C. M. Lagoa and S. N. Brennan (2015), "Vehicle Localization Using In-Vehicle Pitch Data and Dynamical Models," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 16, No. 1, pp. 206-220.

[29] S. Mallat, "A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way", 3rd ed. New York: Academic Press, 2008.

[30] L. Lau (2017), "Wavelet packets based denoising method for measurement domain repeat-time multipath filtering in GPS static high-precision positioning applications", *GPS Solut.*, Vol. 21, No. 2, pp 461–474.

[31] Yang K., Zhang K., Ren J. & Shen X. (2015). "Security and Privacy in Mobile Crowdsourcing Networks: Challenges and Opportunities", IEEE Communications Magazine, pp. 75-81.