

# Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima

---

Juričev-Grgin, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:938303>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Petra Juričev-Grgin**

**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, 2023. god.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**ANALIZA STANJA TRAMVAJSKOG KOLOSIJEKA NA  
TEMELJU MJERENJA U TRAMVAJSKOM VOZILU  
PAMETNIM TELEFONIMA**

**Diplomski rad**

Izradila:

**Petra Juričev-Grgin**

Mentor:

izv.prof.dr.sc. **Ivo Haladin**

**Zagreb, 2023. god.**



## TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Petra Juričev-Grgin**

JMBAG: **0083218198**

Diplomski rad iz predmeta: **Vibracije od prometa**

Naslov teme  
diplomskog rada:

|     |   |
|-----|---|
| HR  | <b>Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima</b> |
| ENG | <b>Analysis of tramway track condition based on smartphone data acquired in a tram vehicle</b>            |

Opis teme diplomskog rada:

Uvod

- analiza opisnih parametara kolosijeka u eksploataciji
- mogućnost primjene senzora pametnih telefona
- studija slučaja - trasa tramvajskog kolosijeka u Zagrebu

Zaključak

Literatura

Datum: **17.4.2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

**izv.prof.dr.sc. Ivo Haladin**

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

## Sažetak

Pravovremena i odgovarajuća ocjena stanja kolosijeka glavna je stavka upravljanja nekim tračničkim sustavom, bilo to tramvajski ili željeznički sustav. Ocjena stanja kolosijeka ogleda se na uočavanju odstupanja i nepravilnosti u geometriji kolosijeka, kao i na ocjeni udobnosti vožnje. Ovim radom prikazan je „inovativni“ pristup ocjeni stanja tramvajskog kolosijeka na dionicama tramvajskog sustava grada Zagreba, prikupljenih iz tramvaja u regularnom prometu. Primarni cilj ovog istraživanja je iskoristiti mogućnosti pametnih telefona i njihovih ugrađenih senzora, kao što su akcelerometar i žiroskop, za prikupljanje informacija o geometriji i stanju kolosijeka. Prikupljanje podataka vršeno je na dvije dionice tramvajskog sustava, koristeći senzore dvaju pametnih telefona marke Samsung i sofisticiranijeg akcelerometara postavljenih unutar tramvaja, te mjerenjem geometrije ručnim kolicima TEC-1000. Analiza geometrije provedena je usporedbom vibracija i podataka žiroskopa zabilježenih pametnim telefonima sa podacima bilježenim standardnim mjerenjem geometrije kolosijeka, uz pozicioniranje preko zabilježenih GPS podataka. Prikupljeni podaci iskorišteni su i provedbu ocjene udobnosti vožnje. Unatoč nedostacima i izazova ovakvog pristupa prikupljanju podataka, dobiveni rezultati i zapažanja imaju potencijal poboljšati održivost i performanse tramvajske infrastrukture u urbanim sredinama.

**KLJUČNE RIJEČI:** tramvaj, geometrija kolosijeka, pametni telefoni, udobnost vožnje

## Abstract

Timely and appropriate assessment of track conditions is a crucial aspect of managing any rail system, whether it's a tram or railway system. Evaluating track conditions involves identifying deviations and irregularities in track geometry, as well as assessing ride comfort. This paper presents an innovative approach to assessing the state of the tram track along sections of Zagreb's tram system, gathered from tram in regular operation. The primary aim of this research is to leverage the ubiquity of smartphones and their built-in sensors, such as the accelerometer and gyroscope, to collect information about track geometry and its condition. Data collection was carried out on two sections of the tram system, utilizing sensors from two Samsung smartphone and a more sophisticated accelerometer placed within the tram, along with manual measurement of geometry using the TEC-1000 trolley. Geometry analysis involved comparing vibrations and gyroscope data recorded by smartphones with data obtained from standard track geometry measurements, using positioning via recorded GPS data. The collected data was also utilized to assess ride comfort. Despite the challenges encountered during this research, the obtained results and observations have the potential to enhance the sustainability and performance of tram infrastructure in urban environments.

**KEYWORDS:** tram, track geometry, smartphones, ride comfort

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

*Najveće hvala mojoj obitelji, mojim roditeljima i bratu na neizmjerne podršci u svim usponima i padovima tijekom studija. Ovaj rad posvećujem njima jer je njihov koliko i moj!*

*Također se zahvaljujem mentoru izv.prof.dr.sc. Ivi Haladinu, te svim profesorima i asistentima sa smjera Prometnice na divnom iskustvu i pruženom znanju.*

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

## Popis slika:

|   |    |
|---|----|
| <b>Slika 1.</b> Širina tramvajskog kolosijeka .....   | 4  |
| <b>Slika 2.</b> Nadvišenje kolosijeka [2] .....   | 5  |
| <b>Slika 3.</b> Horizontalne nepravilnosti kolosijeka [2] .....   | 6  |
| <b>Slika 4.</b> Prikaz horizontalne nepravilnosti na žljebastoj tračnici [3].....   | 7  |
| <b>Slika 5.</b> Prikaz vertikalne nepravilnosti na žljebastoj tračnici [3].....   | 7  |
| <b>Slika 6.</b> Tračničko mjerno vozilo EM-120<br>[IZVOR: <a href="https://hr.wikipedia.org/wiki/Tračničko_mjerno_vozilo_EM-120">https://hr.wikipedia.org/wiki/Tračničko_mjerno_vozilo_EM-120</a> ].....  | 10 |
| <b>Slika 7.</b> Težinski faktori za određivanje indeksa mirnoće hoda (B) i indeksa udobnosti vožnje (Bw, Bs) [12].....  | 15 |
| <b>Slika 8.</b> Orijentacija senzora u mobilnom telefonu [IZVOR:<br><a href="https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2043">https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2043</a> ].....  | 21 |
| <b>Slika 9.</b> Prikupljeni podaci vibracija s uređaja (ne sinkronizirani) [15] .....   | 23 |
| <b>Slika 10.</b> Kružni grafikon postotka različitih zona udobnosti u 4-minutnom putovanju prema Sperlingovom indeksu i ISO 2631-1 standardu [15] .....   | 23 |
| <b>Slika 11.</b> <i>Određivanje nagiba karoserije vozila pomoću žiroskopa brzine kotrljanja (gyro_x) i podataka o bočnom ubrzanju prikupljenih putem pametnih telefona unutar vozila [16] .....</i>   | 25 |
| <b>Slika 12.</b> Tlocrtni prikaz ispitivane dionice pruge, s naglaskom na parametre trase i važne strukture duž pruge [17] .....  | 26 |
| <b>Slika 13.</b> Rezultati izračunati iz podataka senzora pametnih telefona i uspoređenih s TRV vozilom koje snima kolosijek: a) horizontalna zakrivljenost; b) izračunato i izmjereno nadvišenje kolosijeka; c) izračunato i izmjereno vitoperenje kolosijeka preko 6 m baze [17]..... | 27 |
| <b>Slika 14.</b> <i>Trasa tramvajske linije 15 Mihaljevac – Dolje [18].....</i>   | 29 |
| <b>Slika 15.</b> <i>Prikaz dionice 2: Mihaljevac-Grškovićeve .....</i>  | 30 |
| <b>Slika 16.</b> Mjerna kolica TEC-1000 .....   | 31 |
| <b>Slika 17.</b> Prikaz konstrukcije mjernih kolica i položaja senzora [6].....   | 32 |
| <b>Slika 18.</b> Mjerenje geometrije TEC-1000 ručnim kolicima .....   | 33 |
| <b>Slika 19.</b> Specifikacije Samsung SM-G955F uređaja .....   | 34 |
| <b>Slika 20.</b> Frekvencija Samsung SM-G955F uređaja .....   | 34 |
| <b>Slika 21.</b> Specifikacije Samsung SM-A528B uređaja .....   | 35 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 22.</b> Frekvencija Samsung SM-A528B uređaja.....   | 35 |
| <b>Slika 23.</b> Položaj pametnih telefona u putničkom prostoru i položaja osi mjerenja akceleracija.....  | 36 |
| <b>Slika 24.</b> Lokacija mjernih uređaja unutar TMK 2300 .....  | 37 |
| <b>Slika 25.</b> Lokacija mjernih uređaja unutar TMK 2200 .....  | 38 |
| <b>Slika 26.</b> Vremenski zapis akceleracija u X,Y i Z smjeru na poddionici Gračansko Dolje-Mihaljevac snimljen Samsung A52 uređajem .....                            | 39 |
| <b>Slika 27.</b> Vremenski zapis akceleracija u X i Y smjeru na poddionici Gračansko Dolje-Mihaljevac snimljen umjerenim akcelerometrom klase 1 (cDAQ).....            | 40 |
| <b>Slika 28.</b> Ponderirane krivulje za uzdužni, bočni (Wd) i vertikalni smjer (Wb) [12] ...  | 41 |
| <b>Slika 29.</b> Mihaljevac-Gračansko Dolje_X .....  | 42 |
| <b>Slika 30.</b> Mihaljevac-Gračansko Dolje_Z.....   | 42 |
| <b>Slika 31.</b> Gračansko Dolje-Mihaljevac_X .....  | 43 |
| <b>Slika 32.</b> Gračansko Dolje-Mihaljevac_Z.....   | 43 |
| <b>Slika 33.</b> Gupčeva zvijezda – križanje Branimirove i Držičeve_X.....   | 44 |
| <b>Slika 34.</b> Gupčeva zvijezda – križanje Branimirove i Držičeve_Z.....   | 45 |
| <b>Slika 35.</b> Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Zapruđe_X .....   | 46 |
| <b>Slika 36.</b> Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Zapruđe_Z.....  | 46 |
| <b>Slika 37.</b> Okretište Zapruđe - Križanje Branimirove i Držičeve_X .....   | 47 |
| <b>Slika 38.</b> Okretište Zapruđe - Križanje Branimirove i Držičeve_Z.....  | 47 |
| <b>Slika 39.</b> Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Mihaljevac_X.....   | 48 |
| <b>Slika 40.</b> Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Mihaljevac_Z.....   | 48 |
| <b>Slika 41.</b> Okretište Mihaljevac-Ribnjak_X.....   | 49 |
| <b>Slika 42.</b> Okretište Mihaljevac-Ribnjak_Z.....   | 49 |
| <b>Slika 43.</b> Prikaz promjene nadvišenja kroz krivinu, te orijentacije sanduka vozila na temelju senzora žiroskopa, te senzora orijentacije mobilnog telefona ..... | 51 |
| <b>Slika 44.</b> Grafički prikaz nadvišenja vozila i zaokreta sanduka vozila .....   | 52 |



## **Popis tablica:**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablica 1.</b> <i>Granične vrijednosti Sperlingovog indeksa mirnoće hoda [12]</i> ..... | 15 |
| <b>Tablica 2.</b> Granične vrijednosti Sperlingovog indeksa udobnosti vožnje hoda [12]..   | 16 |
| <b>Tablica 3.</b> Očekivana reakcija putnika na jačine vibracija prema ISO 2631-1 [14]...  | 17 |
| <b>Tablica 4.</b> Ljestvica kontinuirane udobnosti [12] .....                              | 18 |
| <b>Tablica 5.</b> Ocjene razine udobnosti prema UIC 513 [14].....                          | 20 |

## **Popis priloga:**

**Prilog 1.** Grafički prikaz parametara geometrije kolosijeka mjernim uređajem TET 1000 na dionici 2: Mihaljevac-Grškovićevo, (poddionica Gupčeva zvijezda-Belostenčeva)

**Prilog 2.** Grafički prikaz podataka zabilježenih unutar tramvajskog vozila na poddionici Gračansko Dolje-Mihaljevac

# Sadržaj

|  |    |
|--|----|
| 1. Uvod .....  | 1  |
| 2. Geometrija kolosijeka .....                           | 3  |
| 2.1. Parametri geometrije kolosijeka.....                | 3  |
| 2.2. Mjerenje geometrije kolosijeka .....                | 8  |
| 3. Udobnost vožnje.....                                  | 13 |
| 4. Primjena pametnih telefona.....                       | 21 |
| 5. Prikupljanje podataka .....                           | 28 |
| 5.1. Opis mjerenih dionica .....                         | 28 |
| 5.2. Mjerenje geometrije mjernim kolicima TEC-1000 ..... | 30 |
| 5.3. Prikupljanje podataka pametnim telefonima .....     | 34 |
| 6. Analiza podataka .....                                | 39 |
| 6.1. Analiza udobnosti vožnje .....                      | 40 |
| 6.1.1. Dionica 1: Mihaljevac-Gračansko Dolje .....       | 41 |
| 6.1.2. Dionica 2: Mihaljevac - Zapruđe.....              | 43 |
| 6.2. Analiza parametara geometrije kolosijeka .....      | 50 |
| 7. Zaključak .....                                       | 53 |
| Popis literature.....                                    | 55 |

## 1. Uvod

Temelj svakog sigurnog i pouzdanog tračničkog sustava kao što su željeznički i tramvajski sustavi provođenje je odgovarajuće i pravovremene ocjene kvalitete kolosijeka. Ocjena kvalitete kolosijeka bazira se prvenstveno na uočavanju odstupanja i nepravilnosti u geometriji kolosijeka. Zbog toga se prilikom opisivanja stanja kolosijeka promatraju razni pokazatelji geometrije kolosijeka kao što su: širina kolosijeka, nadvišenje, vitoperenje, te horizontalne i vertikalne nepravilnosti. S obzirom da odstupanja od željenih parametara mogu dovesti do povećanog trošenja i habanja željezničkih vozila, smanjenja udobnosti putnika, pa čak i iskliznuća iz tračnica potrebno je održavanje pravilne geometrije. Geometrija kolosijeka razlikuje se ovisno o tračničkom sustavu kojeg promatramo, pa tako i mjerenje geometrije tramvajskih sustava i mjerenje geometrije klasičnih željezničkih sustava uključuje različite pristupe i razmatranja zbog jedinstvenih karakteristika i radnih okruženja tramvaja i vlakova.

Jedan važan aspekt upravljanja geometrijom kolosijeka je korištenje suvremenih mjernih sustava, uključujući laserske uređaje i GPS tehnologiju, koji omogućuju precizno i beskontaktno praćenje parametara kolosijeka. Ovi sustavi nude prednosti u odnosu na tradicionalne metode, kao što su ručna mjerenja pomoću vozila za inspekciju stanja kolosijeka ili vizualnih pregleda, budući da daju podatke u stvarnom vremenu i mogu učinkovito pokriti velike dionice trase.

Osim beskontaktnih metoda, proučavale su se i metode temeljene na dinamičkoj interakciji tračničkog vozila i kolosijeka, tj. na inercijskim sustavima mjerenja kod vozila u prometu. Istraživanje takvog sustava mjerenja provedeno je u Mađarskoj [1-3] korištenjem vozila u prometu, koje osiguravaju mjerenje pod opterećenjem. Sustavi mjerenja geometrije kolosijeka pod opterećenjem uglavnom se primjenjuju na većim željezničkim mrežama, dok kod tramvajskih kolosijeka nije široko rasprostranjeno. U nedostatku vozila za snimanje kolosijeka pod opterećenjem, Bocz i Vinkó [2] 2016. godine proveli su eksperimentno mjerenje na odabranoj tramvajskoj liniji u Budimpešti, prilikom koje se koristila metoda mjerenja dinamike vozila bilježenjem podataka akcelerometara s tri osi (montiranih na diskove kotača i bočni okvir okretnog postolja) za otkrivanje nepravilnosti kolosijeka pod opterećenjem, kako bi se postigla usporedba rezultata s mjerenjima izvedenim s kolicima za praćenje geometrije kolosijeka u

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

neopterećenom stanju. Navedena istraživanja [1-3] dovela su autore do zaključka da iako uvedeni sustav mjerenja dinamike vozila ne daje egzaktne podatke geometrije kolosijeka, razvijeni parametri imaju mogućnost detekcije loše geometrije kolosijeka i strukturalnih problema kao što su pogrešni zavari, spojevi i spojevi tračnica.

No, u ovom radu usredotočiti ćemo se na istraživanje i analizu stanja kolosijeka, kao i analizu udobnosti vožnje pomoću podataka zabilježenih unutar tramvaja putem pametnih telefona na odabranim dionicama tramvajskog sustava grada Zagreba, gdje razgranata tramvajska mreža služi kao okosnica javnog gradskog prijevoza. Uzimajući u obzir podatke s pametnog telefona prikupljene iz tramvajskog vozila te koristeći prednost modernih tehnika analize podataka, ovo istraživanje ima cilj procjene stanja tramvajskih pruga u gradu Zagrebu. Time se nastoje pružiti korisni uvidi u kvalitetu tramvajske infrastrukture.

U narednim poglavljima obrađeni su osnovni parametri i mjerenja geometrije kolosijeka, metode ocjene udobnosti vožnje kao i neke od mogućnosti primjene senzora pametnih telefona.

Prikupljanje podataka, opis mjerenih dionica, te obrada i analiza rezultata prikazani su u **poglavljima 5. i 6.**

## 2. Geometrija kolosijeka

Geometrija kolosijeka odnosi se na fizičke karakteristike i trasu željezničkih ili tramvajskih kolosijeka, uključujući parametre kao što su širina kolosijeka, nadvišenje, horizontalne i vertikalne nepravilnosti, te vitoperenje kolosijeka (detaljnije objašnjeni u potpoglavlju 2.1.) .

Uslijed sila induciranih prometom, te problema odvodnjavanja i donjeg ustroja, dolazi do propadanja gotovo svih elemenata kolosijeka kao i same geometrije kolosijeka. Pa će tako kolosijeci s lošijom geometrijom pokazivati znakove bržeg propadanja i češće pojave oštećenja koje mogu izazivati poremećaje u prometovanju. Kako bi se produžilo trajanje elemenata kolosijeka potrebno je osigurati pravilno i pravovremeno kontroliranje kvalitete geometrije kolosijeka kroz provođenje određenih strategija mjerenja i analize. Za mjerenje geometrije kolosijeka većinom se primjenjuju najnovije tehnike beskontaktnog optičkoelektroničkog i beskontaktnog inercijalnog mjerenja, umjesto tradicionalnih kontaktnih mjerenja [4] .

### 2.1. Parametri geometrije kolosijeka

Sukladno europskoj normi *EN 13848-1:2019: "Definiranje kolosiječne geometrije"* [5], ocjena kvalitete geometrije kolosijeka određena je s pet osnovnih parametara:

- širinom kolosijeka  $G$
- nadvišenjem  $C$
- vitoperenjem kolosijeka  $T$
- horizontalnim nepravilnostima  $H$
- vertikalnim nepravilnostima  $V$

#### **Širina kolosijeka**

Širina kolosijeka  $G$  je udaljenost između unutarnjih bočnih strana tračnica, na propisima definiranoj udaljenosti ispod vrha glave tračnice [6].

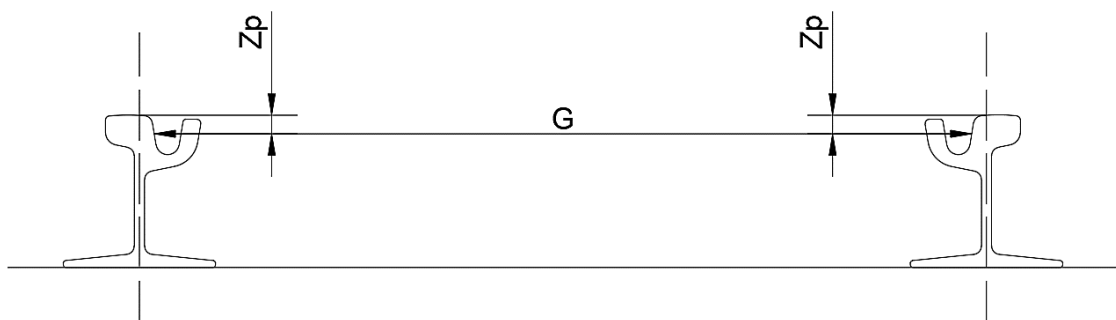
Prema *Propisniku o održavanju pruge i pružnih postrojenja* [7]., koji se odnosi isključivo na prugu i pružna vozila Zagrebačkog električnog tramvaja, razmak tračnica na

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

kolosijeku u pravcu određen je u širini od 1 000 mm, 9 mm (propisana udaljenost  $Z_p$ ) ispod vrha tračnice na unutarnjim bočnim stranama glave tračnice. Odstupanje od osnovne širine kolosijeka kod kolosijeka u eksploataciji dopušta se u rasponu od – 2 mm do +25 mm kod kolosijeka bez pragova s poprečnim spojnicama i žljebnatim tračnicama. Širina kolosijeka  $G$  kod žljebnatih tračnica tramvajskog kolosijeka prikazana je na **Slici 1**.



**Slika 1.** Širina tramvajskog kolosijeka

Širina kolosijeka može se mjeriti kontaktnim ili beskontaktnim sustavom. Sustavi koji zahtijevaju fizički kontakt s kolosijekom pokazuju svoje ograničenje kod mjerenja pri visokim brzinama kretanja, te iziskuju stalni nadzor, kontrolu, kalibraciju, popravke i zamjene komponenata, posebice mjernih kotačića. Trošenje mjernih kotačića utječe i na preciznost mjerenja, jer neravnomjernosti koje se nakupljaju na tim komponentama dovode do nerealnih i često pogrešnih rezultata, što rezultira lažnim detekcijama defekata i potrebom za čestim održavanjem. Za dijelove kolosijeka s velikim trošenjem tračnice vrlo često se događa da se neke vrijednosti mjerenja "izgube", tj. da se na tim mjestima mjerenja ne mogu obaviti. Također, kod kontaktnih mjerenja potrebna je česta kalibracija prije, a često i za vrijeme mjerenja kao što je slučaj kod cjelodnevnih mjerenja [4].

S obzirom na količinu mogućih pogrešaka i česte kalibracija prilikom korištenja kontaktnih sustava, sve više su u upotrebi beskontaktni sustavi. Većinom su to laserski beskontaktni sustavi bazirani na mjerenju "strelice" tetive koji imaju mogućnost izvršiti mjerenja pri izuzetno velikim brzinama ali i izuzetno niskim brzinama.

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

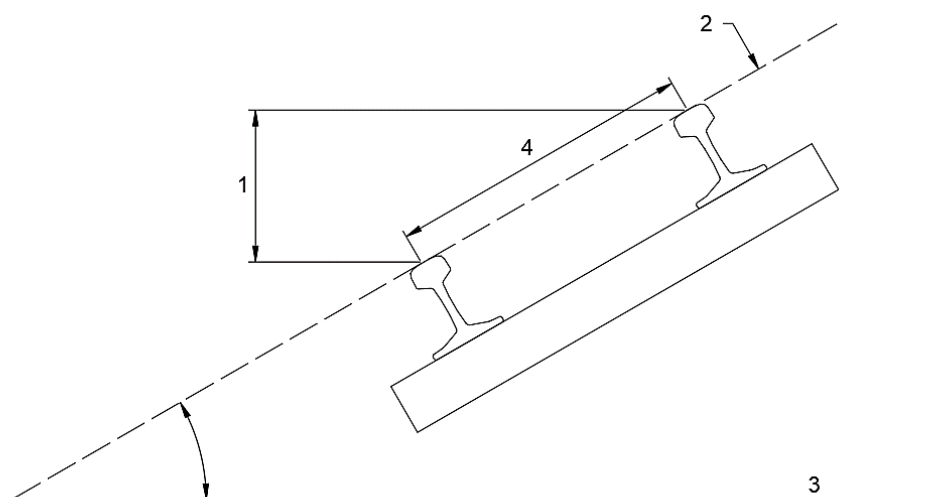
Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

Eksplicitne promjene širine kolosijeka nije moguće izravno mjeriti inercijalnim sezorima pametnih telefona montiranih u sanduku vozila, no moguće je pratiti posljedice nemirne vožnje uzrokovane nepravilnom širinom kolosijeka.

### **Nadvišenje kolosijeka**

Visinski odnos tračnica u pravcu ili nadvišenje u krivini  $C$  je razlika u visini između dviju paralelnih tračnica, ovisna o kutu koji zatvaraju ravnina vozne površine tračnica i referentna horizontalna ploha [6]. Prema [5], izražava se kao visina okomitog kraka pravokutnog trokuta s hipotenuzom koja se odnosi na nominalnu širinu kolosijeka plus širina glave tračnice zaokružena na najbližih 10 mm. Na **Slici 2.** prikazana je skica nadvišenja kolosijeka.

Mjerenje nadvišenja kolosijeka mjeri se putem inercijalnog mjernog sustava



- 1 - nadvišenje  $C$
- 2 - vozna površina
- 3 - horizontalna referentna linija
- 4 - hipotenuza

**Slika 2.** Nadvišenje kolosijeka [2]

S obzirom na to da suvremeni pametni telefoni posjeduju inercijalne senzore koji mogu detektirati promjenu kuta, u radu će se istražiti mogućnost njihove primjene za detekciju nadvišenja kolosijeka.

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

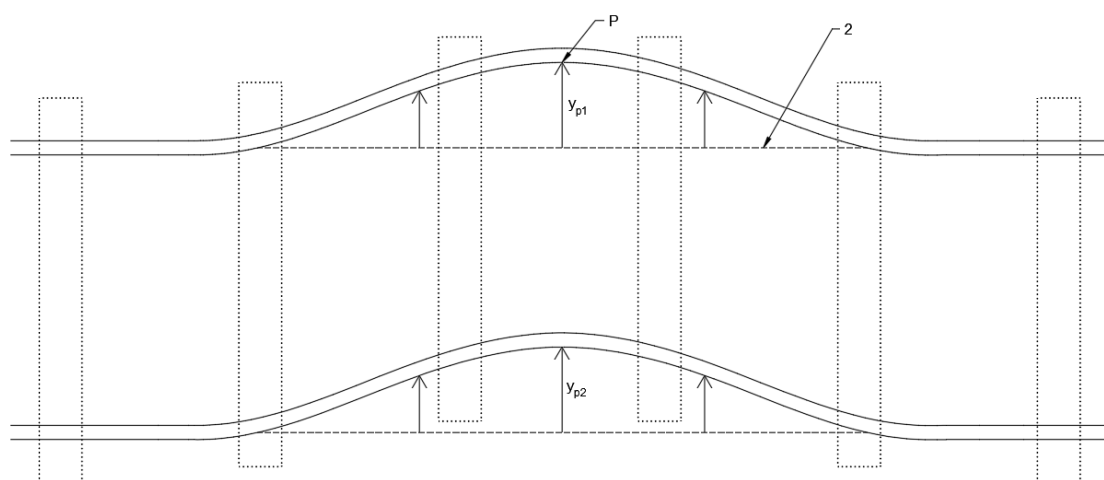


### **Vitoperenje kolosijeka**

Vitoperenje kolosijeka  $T$  definira se kao algebarska razlika između dva nadvišenja uzetih na definiranoj međusobnoj udaljenosti, obično izražena kao nagib između dviju točaka mjerenja.

### **Horizontalne nepravilnosti**

Horizontalne nepravilnosti ili smjer kolosijeka  $H$  (**Slike 3. i 4.**), je devijacija glave tračnice ( $y_p$ ) u horizontalnoj ravnini izražena odstupanjem od prosječne longitudinalne osi tračnica u pravcu (u krivinama se smjer promatra ovisno o radijusu zakrivljenosti) [6].



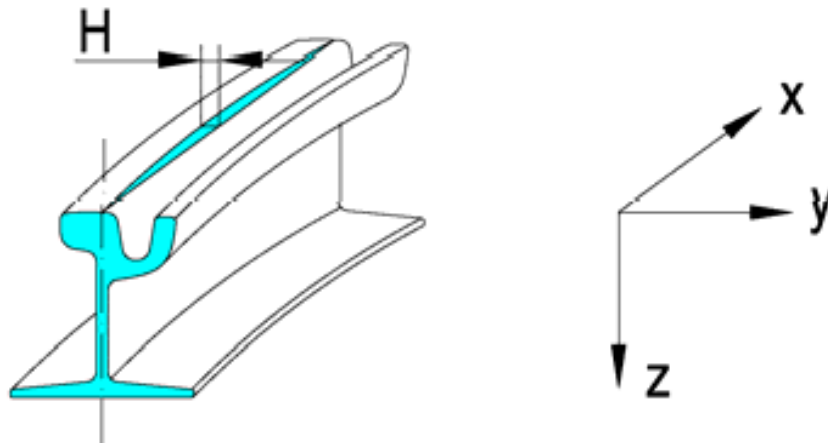
P - točka P prema širini kolosijeka  
 2 - referentna linija  
 $y_p$  - odstupanje/devijacija u y-smjeru

**Slika 3.** Horizontalne nepravilnosti kolosijeka [2]

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

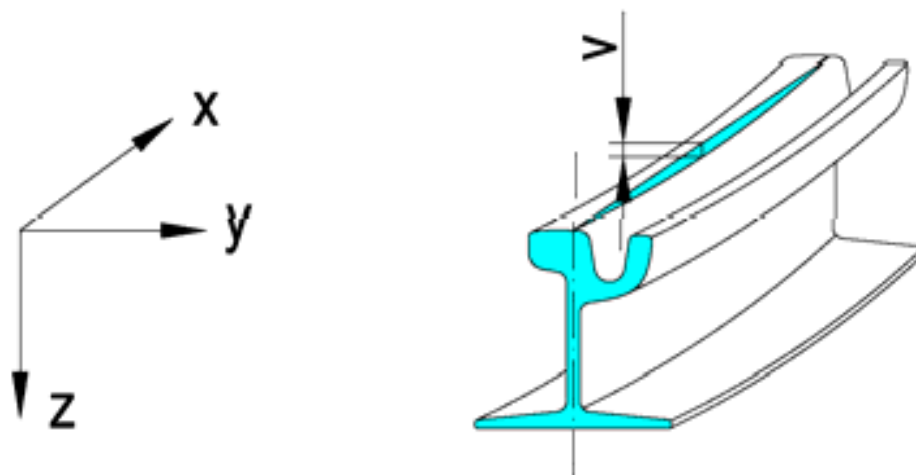
Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**



**Slika 4.** Prikaz horizontalne nepravilnosti na žlebastoj tračnici [3]

### **Vertikalne nepravilnosti**

Vertikalne nepravilnosti ili razina tračnica V (**Slika 5.**), vertikalna je devijacija vozne površine izražena odstupanjem od prosječne visine tračnice [6]. Prema *Europskoj normi 13848-1:2019* [5] referentna linija i vertikalna odstupanja izračunavaju se iz uzastopnih mjerenja, te se mjerenja provode ili inercijskim sustavom ili “versine” sustavom ili kombinacijom obje metode. Kod mjerenja vertikalnih nepravilnosti, prema dosadašnjim istraživanjima, kvalitetnije rezultate daje kontaktno mjerenje.



**Slika 5.** Prikaz vertikalne nepravilnosti na žlebastoj tračnici [3]

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

## 2.2. Mjerenje geometrije kolosijeka

Europska komisija za normizaciju tijekom 2008. godine pripremila je europsku normu EN 13848: „*Željeznički sustav – Željeznički gornji ustroj – Kvaliteta geometrije kolosijeka*“ kako bi definirali parametre i razine kvalitete kolosiječne geometrije, te mjerne uređaje/sustave. Prema EN 13848, navedeni mjerni uređaji podijeljeni su na: tračnička vozila za snimanje kolosiječne geometrije (*EN 13848-2*), kolosiječne strojeve za gradnju i održavanje sa ugrađenim sustavima za mjerenje geometrije kolosijeka (*EN 13848-3*), te ručne i lagane mjerne uređaje (*EN 13848-4*). Navedeni mjerni uređaji baziraju se na željezničke sustave, no nalaze svoju primjenu i kod tramvajskih sustava.

Norma *EN 13848* propisuje tri intervala valne duljine za ocjenu geometrije kolosijeka: D1 (od 3 do 25 m), D2 (od 25 do 70 m) i D3 (od 70 do 150 m). Za detekciju kraćih valnih duljina kod željezničkih sustava, norma predlaže produljenje donje granice D1 za 1 m.

Prije uvođenja mjernih uređaja kao što su tračnička vozila za snimanje geometrije, mjerenja su se obavljala ručno. Podaci prikupljeni ručnim mjerenjima bili su previše opsežni i nezgrapni, te je iz njih bilo vrlo teško izvući bilo kakve smislene upravljačke zaključke. Pojavom raznih mjernih uređaja, ali i dodatnim razvojem modernih sustava i tehnologija mjerenja i obrade podataka omogućilo se kvalitetnije praćenje kvalitete kolosijeka tijekom eksploatacijskog perioda.

### ***Tračnička vozila za snimanje kolosiječne geometrije***

Vozila za snimanje kolosiječne geometrije samohodna su ili vučena vozila s fiksnom mjernom opremom, koja se koriste za mjerenje, ocjenu i bilježenje parametara geometrije kolosijeka u uvjetima opterećenja, te mjere i daju dosljedne rezultate prema zahtjevima propisanim europskom normom *EN 13848-1*. Prilikom mjerenja istog kolosijeka, sustavi za bilježenje geometrije kolosijeka trebaju dati dosljedne i usporedive rezultate neovisno o brzini mjerenja i smjeru vožnje kako bi se ti isti rezultati mogli koristiti za praćenje kvalitete kolosijeka ali i razvoj strategija održavanja kolosijeka. Sustavi za mjerenje kolosiječne geometrije, koje koriste tračnička vozila, oslanjanju se na senzore, prijenos signala i obradu signala prema različitim principima

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

mjerenja navedenim u aneksima norme *EN 13848-2*. Mogućnosti senzora trebaje biti takve da u stvarnom vremenu mogu mjeriti parametre geometrije kolosijeka ili njihove komponente, te bi trebali biti postavljeni ispod okvira vozila što je moguće bliže jednoj od opterećenih osovina da bi se ispoštovali uvjeti mjerenja određeni normom [8]

Tračnička vozila primjenjuju različite mjerne sustave kao što su mjerni sustav s tetivom, te inercijsko mjerenje. Ako se koriste mjerni sustavi s tetivom, tada raspon brzine mora biti od mirovanja do najveće dopuštene mjerne brzine vozila. Ako se koriste inercijska mjerenja tada za mjerenje nekih parametara može biti potrebna samo minimalna brzina koju prema karakteristikama korištenog sustava i potrebama definira upravitelj infrastrukture [8].

Za mjerenje nepravilnosti na kolosijeku, u upotrebi su različite vrste vozila i strojeva, koje općenito možemo podijeliti na vozila za snimanje kolosijeka (TRV - „*Track Recording Vehicles*“ ),te vagone ili željezničke „automobile“ za snimanje kolosijeka (TRC – „*Track Recording Cars*“). Iako oba služe istoj svrsi u pogledu inspekcije kolosijeka i prikupljanja podataka, značajno se razlikuju u dizajnu, namjeni i radu. Osnovna razlika očituje se u tipu vozila i njihovoj mobilnosti. Prema tome, TRV su vozila na vlastiti pogon posebno dizajnirana za pregled trase i prikupljanje podataka te imaju vlastiti izvor energije i mogu se samostalno kretati po tračnicama, dok su TRC obično vagoni bez pogona ili vagoni koje vuku/guraju lokomotive što znači da se za svoje kretanje oslanjaju na vanjsku lokomotivu. Osim toga, za razliku od TRC vagona koji su dizajnirani za jednosmjernu vožnju u smjeru koju određuje lokomotiva, TRV su mobilne jedinice koje mogu putovati kolosijecima pri različitim brzinama i u oba smjera čiju pokretljivost kontroliraju strojovođe unutar vozila.

U Hrvatskoj je trenutno u upotrebi tračničko mjerno vozilo EM-120 proizvođača Plasser & Theurer (**Slika 6.**), u vlasništvu Hrvatskih željeznica. Po svojim obilježjima svrstavamo ga u grupu TRV vozila.



**Slika 6.** Tračničko mjerno vozilo EM-120

[IZVOR: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tračničko\\_mjerno\\_vozilo\\_EM-120](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tračničko_mjerno_vozilo_EM-120)]

### **Kolosiječni strojevi za gradnju i održavanje**

Strojevi za izgradnju i održavanje kolosijeka samohodni su strojevi ili vozila koji se koriste u izgradnji, održavanju i poboljšanju kvalitete infrastrukture i koji su opremljeni sustavima za mjerenje geometrija kolosijeka. Dio su „on-track“ strojeva (OTM), točnije to su „on track“ mjerni strojevi (OTMM – „*On Track Measuring Machines*“). Sustavi za mjerenje kolosiječne geometrije instalirani na OTMM strojevima trebaju: mjeriti parametre geometrije kolosijeka, mjeriti udaljenost koju vozilo prijeđe tijekom mjernih operacija, te povezati prethodno navedena dva mjerenja kako bi odredili točnu lokaciju i obradili zabilježene podatke (po mogućnosti u vozilu) i zatim preko izmjerenih parametara odrediti ostale parametre geometrije kolosijeka kako bi izvršili potrebnu analizu parametara kolosiječne geometrije. Ovi strojevi također mogu sudjelovati u procjeni kvalitete geometrije kolosijeka uz skladu za zahtjevima navedenim u normi *EN 13848-2* ili zahtjevima navedenim u normi *EN 13848-3* u čijem slučaju se mora uzeti u obzir smanjena razina kvalitete mjerenja. Zbog kratke duljine tetive (10 do 15 m), „decolouring“ signala u valne duljine dulje od D1 se ne prakticira [9].

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

### ***Ručni i lagani mjerni uređaji***

Kolica za mjerenje geometrije kolosijeka, tj. „*Track Geometry Measuring Trolley*“ (TGMT), predstavljaju lagane mjerne uređaje dizajnirane za mjerenje jednog ili više parametara geometrije. Mogu biti samohodna, vučna ili pokretana ljudskom silom. Karakterizira ih prenosivost, tj. mogućnost brzog postavljanja na ili izvan trase, mogućnost mjerenja od stanja mirovanja do maksimalne dopuštene brzine kolica, te to što imaju kotače koji ne opterećuju kolosijek. Sustav za mjerenje geometrije kolosijeka instaliran na kolicima za mjerenje služi nekoliko bitnih funkcija, uključujući mjerenje parametara geometrije, određivanje uzdužne udaljenosti između točaka mjerenja, precizno povezivanje podataka o lokaciji s rezultatima mjerenja, obradu prikupljenih podataka (idealno na mjestu mjerenja), te konačno bilježenje tih parametara u formatu kompatibilnom s računalnim sustavima [10].

Ručni uređaji, tzv. „*Manually Operated Devices*“ (MOD), ručni su alati namijenjeni za mjerenje širine kolosijeka i/ili nadvišenja u položaju mirovanja. Sustav za mjerenje geometrije instaliran na ručnim uređajima namijenjen je za mjerenje bar jednog parametra, te povezivanje točne lokacije s izmjerenim podacima kada je uključena pohrana podataka [10].

Primjenu prijenosnih sustava u mjerenju geometrije kolosijeka, za ocjenu stanja kolosijeka, usvojile su gotovo sve tvrtke koje upravljaju tramvajskim sustavima, lakim gradskim željeznicama ili metroima u Europi. Madejski [11] u svom radu o potrebi za prikupljanjem i pohranjivanjem informacija o geometriji kolosijeka, navodi potrebu za pravilima za ocjenu stanja kolosijeka kod tramvajskih sustava i sustava lakih gradskih željeznica, kao i hardverske i softverske alate za postizanje dokumentiranja stanja kolosijeka, te provedbu njegove računalne dijagnostike. Ističe primjenu prijenosnih uređaja u metodologiji procjene stanja kolosijeka temeljenih na mikroprocesorima koji bilježe glavne parametre geometrije u odnosu na prijeđenu udaljenost. Metodologiju procjene stanja kolosijeka temelji na skupini TEx kolica proizvođača Graw sp. z o .o., koja su razvijena kako bi zadovoljila sve potrebe mjerenja na navedenim sustavima. U

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

skupini TEx kolica javljaju se različiti modeli s različitim karakteristikama kao što su TEC kolica sa dijagnostikom kolosijeka i skretnica (ujedno korištena za potrebe mjerenja u ovom radu, te opisana detaljno u potpoglavlju **4.2.**), TEE kolica sa dodatnim elementima za mjerenje širine utora skretnica na željeznicama koje propisuju posebne kontrole geometrije skretnica, Total-TEC kolica sa stativom za optičku prizmu za povezivanje geometrije s geodetskim podacima, te Laser TEC kolica sa lidar senzorom za mjerenje vanjske širine kolosijeka i objekata unutar 7m od osi kolosijeka.

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

### 3. Udobnost vožnje

Udobnost vožnje složen je i subjektivan osjećaj koji se javlja tijekom djelovanja oscilacija i/ili sila inercije, koje prolaze kroz čitavo tijelo, a prouzročene su gibanjem željezničkog vozila [12].

Na stanje udobnosti vožnje može utjecati geometrija tramvajskog kolosijeka te nepravilnosti koje se nalaze na samom kolosijeku. Na razini voznog ruba i vozne površine tračnica, najugroženija mjesta na kolosijeku su zavari tračnica. Na mjestu zavara moguć je lom horizontalne i vertikalne osi vozne površine i voznog ruba tračnice koji uzrokuje dinamički udar na kotače željezničkoga vozila što se potencijalno odražava na korisnike unutar tramvaja.

Za dobivanje uvida u stanje na mrežama lakog tračničkog prijevoza primjenjuje se analiza udobnosti vožnje tj. mirnoće hoda. No, sama analiza vrlo je kompleksno područje koje podrazumijeva mjerenje vibracija pri prometovanju tramvajskog vozila, njihovu obradu i interpretaciju, ali i subjektivni osjećaj putnika na koje te vibracije utječu.

Za ocjenu udobnosti vožnje tramvajskih/željezničkih vozila potrebne su detaljnije metode koje sadržavaju granične vrijednosti iz kojih zatim možemo odrediti ocjenu udobnosti vožnje za svaki segment promatrane dionice, te srednju vrijednost cijele dionice. U sklopu seminarskog rada analizirati će se udobnost vožnje na odabranim dionicama tramvajske pruge koristeći metodu kontinuirane udobnosti obuhvaćene europskom normom EN 12299. U narednom poglavlju detaljnije će se razraditi metode za analizu udobnosti vožnje.

Kroz vrijeme su se ustanovile brojne metode evaluacije udobnosti vožnje u smislu vibracija, sa selektivnom primjenom ovisno o kakvom prometu se radi: urbanom, prigradskom, gradskom, podzemnom, itd.

Uz metodu za ocjenu udobnosti koja će se koristiti u ovom radu (norma EN 12299), također se primjenjuju Sperlingov indeks, metode bazirane na normi ISO 2631-1, UIC 513 standard te anketiranje putnika kao metoda izravnog mjerenja



### **Sperlingov indeks $W_z$**

Sperlingov indeks vožnje  $W_z$  metoda je koja omogućuje procjenu kvalitete vožnje i udobnost vožnje u željezničkim vozilima, a zbog lakšeg razumijevanja dobivenih podataka još uvijek je jedna od najprimjenjenijih metoda za ocjenu stanja udobnosti vožnje. Određuje se na temelju vibracija vozila, daje informaciju o dinamičkom ponašanju vozila i omogućava identifikaciju određenih rješenja za poboljšanje mirnoće hoda i udobnosti vožnje [13]. Pri tome je potrebno odabrati odgovarajuće lokacije akcelerometara za postizanje kvalitetne analize i određivanje indeksa mirnoća hoda, uzimajući u obzir da je indeks  $W_z$  manji u središtu sanduka i veći od dva vozna postolja prema krajevima sanduka.

Analiziranjem ubrzanja u frekvencijskom području od 0,5 Hz do 30 Hz, te frekvencijskim vrednovanjem amplitude ubrzanja dobivamo sljedeće izraze za određivanje indeksa:

- indeks mirnoće hoda:

$$W_z = \sqrt[10]{a^3 \cdot B^3}$$

- indeks udobnosti vožnje:

$$W_z = \sqrt[6.67]{a^2 \cdot B^2},$$

pri čemu  $B$  predstavlja težinski faktor (**Slika 7.**) koji dobivamo preko izraza:

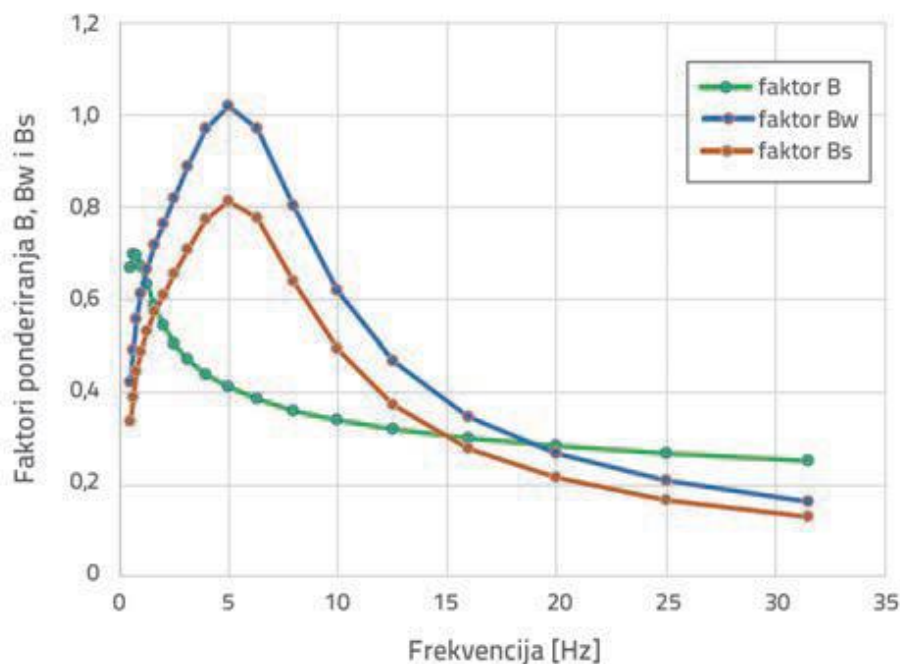
- težinski faktor za mirnoću hoda:

$$B(f) = 1.14 \cdot \sqrt{\frac{[(1 - 0.056f^2)^2 + (0.645f)^2 \cdot (3.55f^2)]}{[(1 - 0.252f^2)^2 + (1.547f - 0.00444f^3)^2] \cdot (1 + 3.55f^2)}}$$

- težinski faktor za udobnost vožnje:

$$B(f) = k \cdot \sqrt{\frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2}}$$

pri čemu je  $k=0,588$  za vertikalne vibracije (faktor  $B_s$ ) i  $k=0,737$  za poprečne vibracije (faktor  $B_w$ )



**Slika 7.** Težinski faktori za određivanje indeksa mirnoće hoda ( $B$ ) i indeksa udobnosti vožnje ( $B_w$ ,  $B_s$ ) [12]

Granične vrijednosti Sperlingovog indeksa za ocjenu mirnoće hoda i udobnosti vožnje određene ispitivanjima vibracija s putnicima prikazane su u **tablici 1** i **tablici 2**.

**Tablica 1.** Granične vrijednosti Sperlingovog indeksa mirnoće hoda [12]

| Indeks $W_z$ | Ocjena stanja                |
|--------------|------------------------------|
| 1            | Vrlo dobra mirnoća hoda      |
| 2            | Dobra mirnoća hoda           |
| 3            | Zadovoljavajuća mirnoća hoda |
| 4            | Prihvatljivo za promet       |
| 4,5          | Nije prihvatljivo za promet  |
| 5            | Opasno                       |

**Tablica 2.** Granične vrijednosti Sperlingovog indeksa udobnosti vožnje hoda [12]

| Indeks $W_z$ | Ocjena stanja (osjetljivost putnika na mehaničke vibracije)                          |
|--------------|--|
| 1            | Jedva primjetne vibracije  |
| 2            | Primjetne vibracije  |
| 2,5          | Jače izražene vibracije, ali nisu neugodne   |
| 3            | Jake, neujednačene, ali još podnošljive vibracije                                    |
| 3,25         | Vrlo neujednačene vibracije  |
| 3,5          | Krajnje neujednačene, neugodne i ometajuće vibracije; nepodnošljiva dulja izloženost |
| 4            | Krajnje neugodne vibracije; štetna dulja izloženost                                  |

**Norma ISO 2631-1**

Norma ISO 2631-1: Ocjena izlaganja ljudi vibracijama čitavog tijela, zagovara metodu ocjenjivanja baziranu na RMS-u koja je temelj za kasnije razvijene metode kao što je EN 12299 i predlaže korištenje frekvencijski ponderiranog RMS ubrzanja za procjenu udobnosti vožnje. RMS (eng. 'root-mean-square') pri tom označava prosječnu vrijednost kvadrata amplitude valnog oblika tijekom njegovog ciklusa.

Frekvencijski ponderirano RMS ubrzanje korišteno za procjenu udobnosti vožnje dano je sljedećim izrazom:

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

pri čemu je  $a_w(t)$  trenutno ubrzanje ponderirano frekvencijom u  $m/s^2$ ,  $t$  je vrijeme mjereno u sekundama, a  $\tau$  vrijeme integracije u sekundama. Vrijednosti dobivene ovim izrazom potrebno je usporediti sa vrijednostima prikazanim u **tablici 3** koja prikazuje odnos RMS ubrzanja i očekivane reakcije putnika.

Ovakva metoda bazirana na normi ISO 2631-1 prikladna je za ocjenjivanje okoline kretanja s malim varijacijama u razinama ubrzanja i frekvencije.

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

**Tablica 3.** Očekivana reakcija putnika na jačine vibracija prema ISO 2631-1 [14]

| RMS amplituda vibracija ( $m/s^2$ ) | Očekivana reakcija putnika |
|-------------------------------------|----------------------------|
| < 0.315                             | Nije neugodno              |
| 0.315 – 0.63                        | Malo neugodno              |
| 0.5 – 1                             | Prilično neugodno          |
| 0.8 – 1.6                           | Neugodno                   |
| 1.25 – 2.5                          | Vrlo neugodno              |
| > 2                                 | Izuzetno neugodno          |

### Norma EN 12299

Norma EN 12299 donešena je od strane Europskog odbora za normizaciju kao norma za mjerenje i ocjenjivanje udobnosti vožnje, te kao takva usvojena u većini zemalja. Za razliku od metode ocjenjivanja bazirane na normi ISO 2631-1, statistička metoda uvedena u normi EN 12299 bavi se fluktuacijama i varijacijama koje se odnose na putnike te izbjegava osjetljivost na artefaktičke ekstreme.

Za ocjenu udobnosti vožnje u normi 12299 definirano je više metoda:

- kontinuirana udobnost  $C_{Cx}$ ,  $C_{Cy}$  i  $C_{Cz}$
- standardna metoda srednje udobnosti  $N_{MV}$
- cjelovite metode srednje udobnosti  $N_{VA}$  i  $N_{VD}$
- udobnosti na diskretnim događajima  $P_{DE}$
- udobnost u prijelaznim krivinama  $P_{CT}$

Za svaku su metodu definirani uvjeti vozila, položaj akcelerometra, brzina ispitivanja, ispitne dionice, relevantni vremenski intervali itd. Zabilježeni signali ubrzanja filtrirani su kroz pojasno propusne filtre ili pojasno niskopropusne filtre te su ponderirani prema krivuljama  $W_c$  i  $W_d$  za bočno i uzdužno gibanje (krivulje su iste kao i u normi ISO 2631-1), samo što su pojasno niskopropusni filter  $W_p$  (koji se koristi u metodama PCT i PDE) i krivulja za ponderiranje  $W_b$  za vertikalni smjer posebno projektirani za primjenu na željeznicama [12].

Norma također predlaže i druge mogućnosti primjene izmjerenih podataka koje se ne odnose na procjenu udobnosti vožnje. Tako se navedene metode mogu iskoristiti i za analizu geometrije kolosijeka, održavanje kolosijeka i održavanje vozila, što je iznimno

korisno kako bi se ocijenili različiti segmenti kolosijeka te utjecaji stanja infrastrukture i održavanja na udobnost vožnje. U svrhu ovog rada će se koristiti samo “kontinuirana udobnost” detaljno objašnjena u nastavku.

#### Kontinuirana udobnost ( $C_{Cx}$ , $C_{Cy}$ i $C_{Cz}$ )

Ova metoda ekvivalentna je metodi opisanoj u normama EN ISO 2631-1 i EN ISO 2631-4, te uključuje novopredloženu krivulju za ponderiranje  $W_b$ . Norma predlaže da vrijeme za uprosječivanje amplitude vibracija iznosi 5 sekundi, a za ocjenu kontinuirane udobnosti koriste se 5-sekundne  $a_{rms}$  vrijednosti. U ovoj metodi razmatraju se sve petosekundne vrijednosti  $a_{rms}$  koje su izračunate na temelju izvornog signala vibracija filtriranog do 100 Hz te koje su ponderirane s krivuljama  $W_d$  i  $W_b$  ovisno o smjeru koordinatnog sustava.

Vrijednosti kontinuirane udobnosti dane su sljedećim funkcijama:

$$C_{Cx} = a_{POX}^{W_d}(t)$$

$$C_{Cy} = a_{POY}^{W_d}(t)$$

$$C_{Cz} = a_{POZ}^{W_b}(t)$$

Izmjerene vrijednosti kontinuirane udobnosti mogu se usporediti s ljestvicom prikazanom u **tablici 4**.

**Tablica 4.** Ljestvica kontinuirane udobnosti [12]

| Uvjet   | Udobnost          |
|---|-------------------|
| $C_{Cx(t)}, C_{Cy(t)}, C_{Cz(t)} < 0,20 \text{ m/s}^2$                      | Vrlo udobno       |
| $0,20 \text{ m/s}^2 < C_{Cx(t)}, C_{Cy(t)}, C_{Cz(t)} < 0,30 \text{ m/s}^2$ | Udobno            |
| $0,30 \text{ m/s}^2 < C_{Cx(t)}, C_{Cy(t)}, C_{Cz(t)} < 0,40 \text{ m/s}^2$ | Srednje udobnosti |
| $C_{Cx(t)}, C_{Cy(t)}, C_{Cz(t)} > 0,40 \text{ m/s}^2$                      | Manje udobno      |

### **Standard UIC 513**

Standard UIC 513 statistička je metoda temeljena na ISO 2631 koja integrira odnos između vibracija i ljudske udobnosti te utjecaj vibracija na ergonomiju. Njegova pouzdanost očituje se u fokusu na karakteristike vibracija željezničkog vozila koje utječu na udobnost putnika, te implicira osjetljivost na neugodne zone. Zbog pogodnog izračuna i eksplicitnih izlaznih rezultata, ovaj standard široko se primjenjuje na optimizaciji rada vlakova međugradskih željeznica [14].

Standard UIC 513 klasificira mjerenje udobnosti u tri uvjeta, koji uključuju: pojednostavljenu metodu mjerenja u sjedećem ili stojećem položaju, kompletnu metodu mjerenja u sjedećem položaju, te kompletnu metodu mjerenja u stojećem položaju.

Pojednostavljena metoda mjerenja udobnost putnika ocjenjuje se putem petominutnih intervala koji su zatim dalje podijeljeni u 60 podintervala od 5 sekundi, a svaki podinterval se transformira u frekvencijsku domenu prije nego što se ponderira. Preko RMS vrijednosti svakog podintervala i uz primjenjenu vjerojatnosti pouzdanosti od 95% vrijednost udobnosti putnika dobiva se sljedećim izrazom:

$$N_{mv} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95}^{W_d})^2 + (a_{YP95}^{W_d})^2 + (a_{ZP95}^{W_b})^2}$$

pri čemu je  $N_{mv}$  udobnost putnika,  $a$  ubrzanje (u X, Y i Z smjeru),  $P$  pozicija na podu vozila gdje se prikuplja ubrzanje,  $W_d$  i  $W_b$  težinski faktori ( $b$  za smjer Z a  $d$  za X i Y), a indeks 95 vjerojatnost pouzdanosti. Ocjene razine udobnosti prema standardu UIC 513 prikazane su u **tablici 5**.

Obzirom na značajne razlike između gradske i međugradske željeznice u vrsti vozila, načinu rada i načinu putovanja putnika, izravna primjena UIC 513 standarda kod ocjene razina udobnosti gradskih željeznica može rezultirati odstupanjima bez dovoljnog referentnog značaja. Stoga su potrebne prilagodbe vremena mjerenja i pozicije mjerenja unutar vozila.

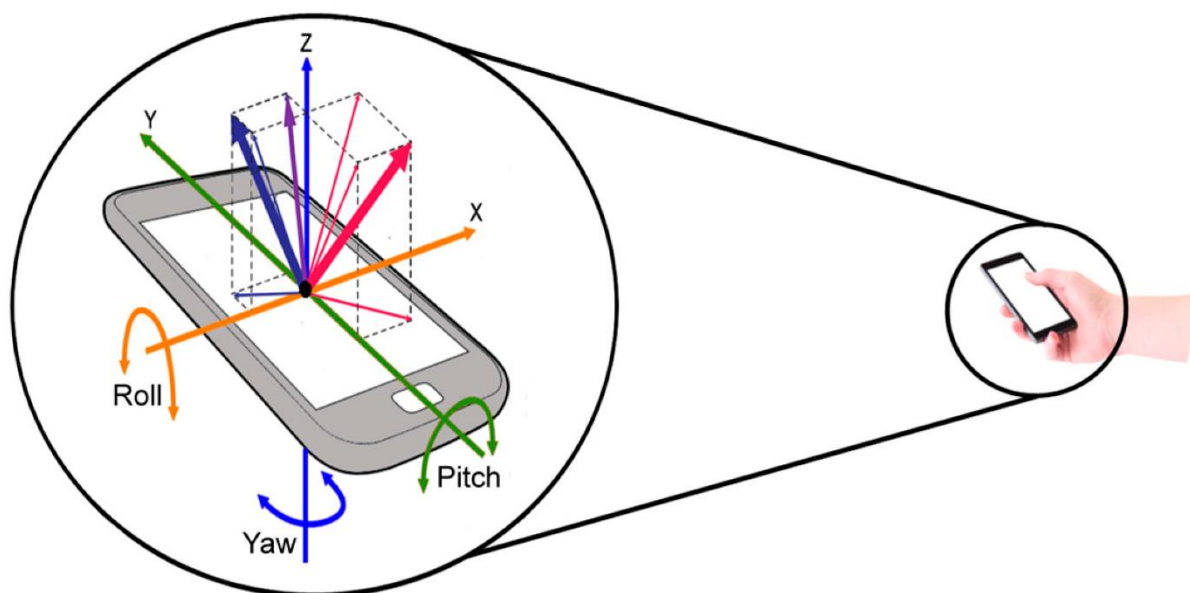
**Tablica 5.** *Ocjene razine udobnosti prema UIC 513 [14]*

| <b>Razina udobnosti</b> | <b>Interval</b> | <b>Ocjena razine udobnosti</b> |
|-------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1                       | $N < 1$         | Vrlo udobno                    |
| 2                       | $1 < N < 2$     | Udobno                         |
| 3                       | $2 < N < 4$     | Umjereno udobno                |
| 4                       | $4 < N < 5$     | Neudobno                       |
| 5                       | $N > 5$         | Jako neudobno                  |

#### 4. Primjena pametnih telefona

Svakodnevna upotreba pametnih telefona i njihovih mnogobrojnih mogućnosti dovela je do raširene primjene telefona u istraživačke svrhe, pa tako i u svrhu ocjene stanja kolosijeka. Razlog tome primarno su senzori koji današnji telefoni posjeduju ali i jednostavnija te ekonomičnija upotreba.

Za razvoj aplikacija koje će očitavati informacije u okolini uređaje te ih pretvarati u funkcionalnosti za upotrebu od strane korisnike, bilo je potrebno razviti i senzore. Svaki mobilni uređaj posjeduje određenu grupu senzora, ovisno o modelu, ali većina uređaja ima akcelerometar, magnetometar i senzor položaja. Platforma Android tako podržava tri široke kategorije senzora: senzore pokreta, senzore okoliša i senzore položaja, a svaka od ove tri kategorije ima veći broj senzora koje zajedno svrstava pod slične funkcionalnosti. Senzori pokreta mjere sile ubrzanja i rotacijske sile duž tri osi. Oni uključuju senzore poput akcelerometara, gravitacijskih senzora, žiroskopa, senzore linearnog ubrzanja, senzore značajnog ubrzanja i rotacijskih vektorskih senzora. Senzori položaja mjere fizički položaj uređaja i uključuju senzore orijentacije i magnetometre. Grafički prikaz orijentacije senzora u mobilnom telefonu prikazano je na **Slici 8**.



**Slika 8.** Orijehtacija senzora u mobilnom telefonu [IZVOR: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2043> ]

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

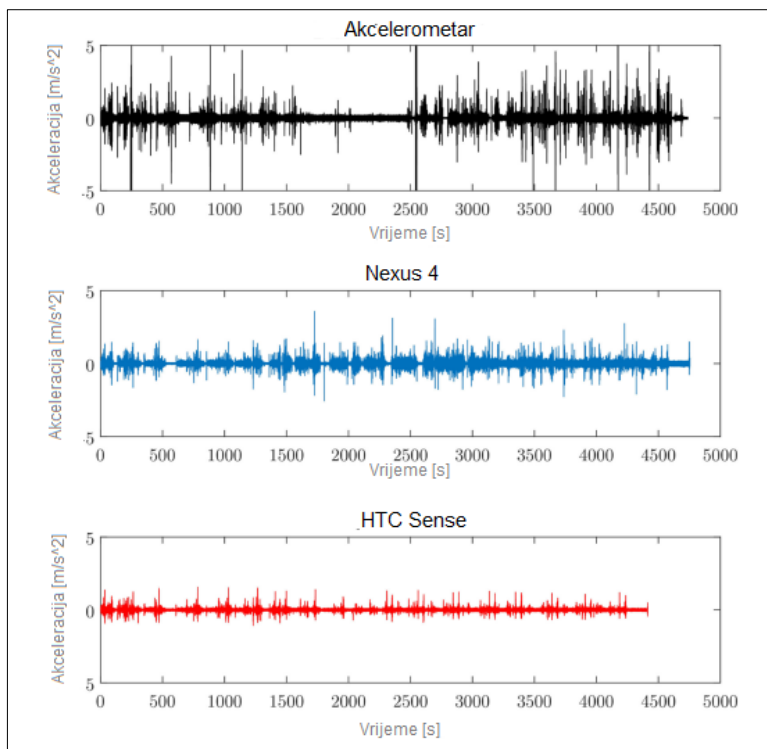
Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**



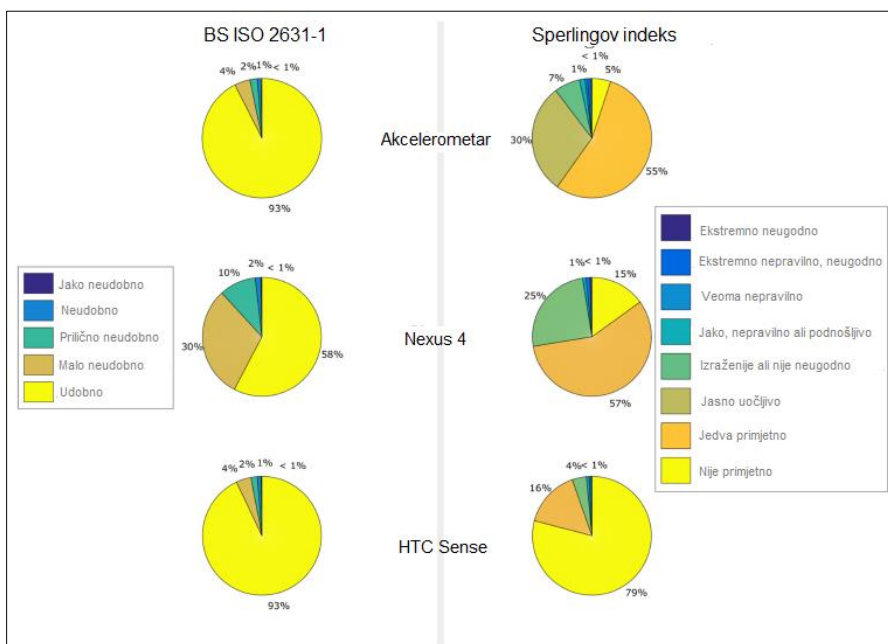
Primjena pametnih telefona na tračničkim sustavima prvi put spomenuta je 2017. godine istraživanjem provedenim u Engleskoj [15], u svrhu razvijanja novih metoda mjerenja udobnosti vožnje unutar tračničkih vozila koristeći akcelerometre ugrađene u pametnim telefonima. Akcelerometri i žiroskopi unutar pametnih telefona oslanjaju se na mjerenje promjene senzora, zbog čega brzina uzorkovanja nije određena već varira ovisno o tome koliko često pametni telefon detektira promjenu u akcelerometru, što naravno ovisi o kvaliteti samih senzora kao i brzini procesora telefona.

### **Korištenje pametnih telefona za praćenje udobnosti vožnje**

Na **Slici 9** prikazani su prikupljeni podaci uređaja, pri čemu su vidljive razlike osjetljivosti, razina vibracija i sl. između uređaja. Kako bi se sinkronizirali prikupljeni podaci s pametnih telefona s onima prikupljenih akcelerometrom te smanjio rizik od unošenja bilo kakvih pogrešaka, prilikom pripreme za analizu u MATLAB programu, podaci su se uzorkovali na 35 Hz, što je bila najniža prosječna brzina uzorkovanja. Regresijska analiza provedena MATLAB-om pokazala je podudarnost podataka uzetih sa pametnih telefona i akcelerometra od 85%, što se smatra dosta kvalitetnom podudarnošću. Ovim istraživanjem, Azzoug i Kaewunruen [15] zaključili su da u usporedbi sa sofisticiranijim akcelerometrima postavljenim unutar mjernog vozila, pametni telefoni pokazuju zavidnu razinu kvalitete prilikom mjerenja udobnosti vožnje iako imaju neke nedosljednosti u pronalaženju nižih razina nelagode. Dobivene razine udobnosti putem Sperling-ovog indeksa i ISO 2631-1 standarda na 4-minutnom intervalu dane su na **Slici 10**.



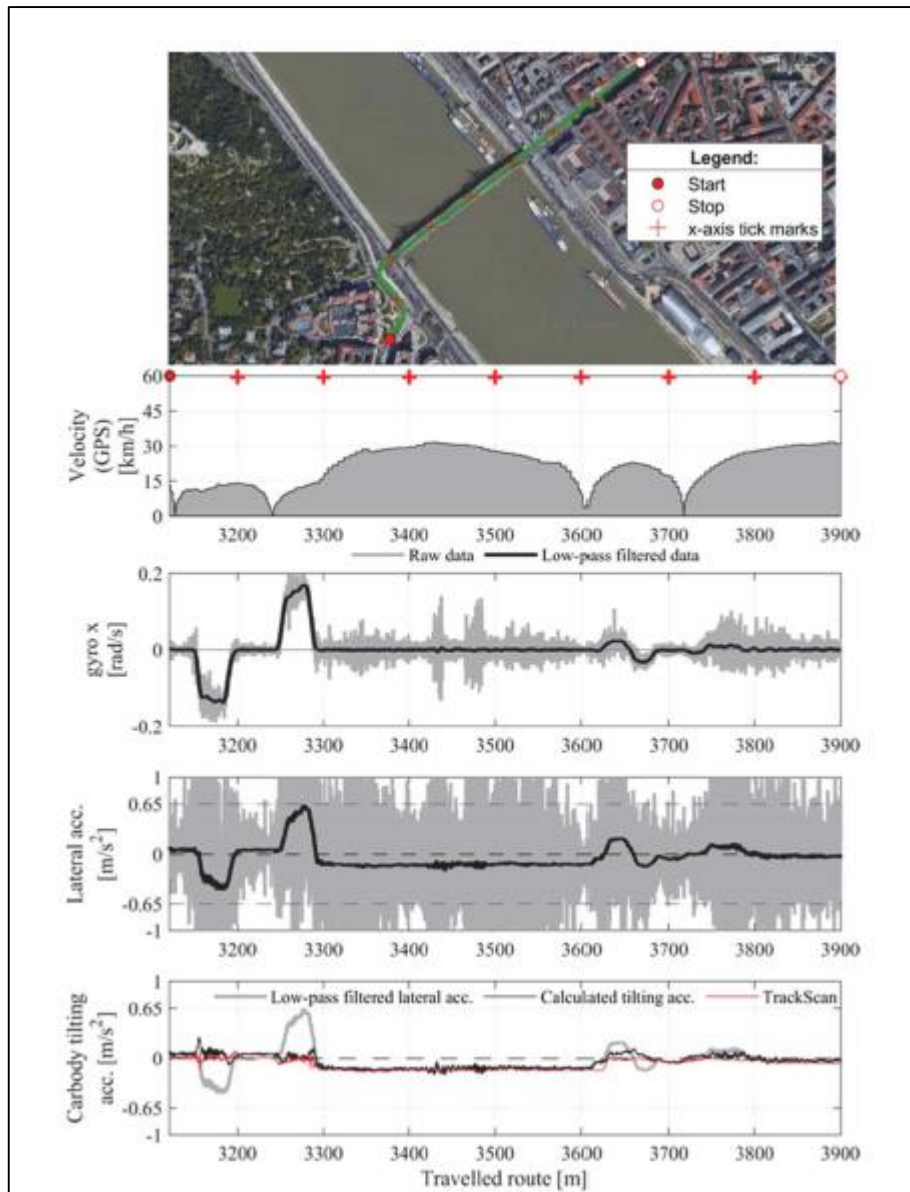
**Slika 9.** Prikupljeni podaci vibracija s uređaja (ne sinkronizirani) [15]



**Slika 10.** Kružni grafikon postotka različitih zona udobnosti u 4-minutnom putovanju prema Sperlingovom indeksu i ISO 2631-1 standardu [15]

## **Korištenje pametnih telefona za praćenje vertikalne geometrije kolosijeka**

Suradnici s Fakulteta građevinarstva u Budimpešti, prilikom provođenja komparativne analize udobnosti vožnje tramvaja u prometu u uvjetima ekstremne horizontalne konfiguracije trase korištenjem senzora pametnih telefona [16], razvili su aplikaciju „CAFat“ za mjerenje kinematičkog gibanja tramvajskih vozila. Svrha aplikacije očituje se u sposobnosti vremenskog sinkroniziranja snimanja svih podataka senzora telefona i informacija o GPS lokaciji što pojednostavljuje snimanje i bilježenja podataka. Kao što sami autori navode [16], ovaj rad predstavlja mjerenje kinematičkih kretanja i vibracija tramvaja korištenjem senzora kretanja pametnih telefona, kao i kvantificiranje ponašanja u zavojima različitih klasa tramvajskih vozila te procjenu dinamičkog odgovora vozila na nepravilnosti kolosijeka/tračnice. Obradom podataka o ubrzanju i podataka žiroskopa dobiven je odnos između bočnog ubrzanja i podataka žiroskopa o brzini na promatranj dionici tramvajske linije u Budimpešti (**Slika 11**). Prvi dijagram prikazuje brzinu koju je zabilježio GPS, drugi predstavlja neobrađene (siva boja) i filtrirane podatke žiroskopa o brzini skretanja (crna boja), dok treći prikazuje nefiltrirana (siva boja) i filtrirane (crna boja) bočna ubrzanja. Ubrzanje karoserije vozila izračunato je razlikom između filtriranog bočnog ubrzanja i izračunatog kvazistatičkog bočnog ubrzanja. Pronalaženjem veze nepravilnog kretanja vozila (bočno njihanje i oscilacija) s parametrima trase, dobivena je mogućnost ispitivanja ponašanja tramvaja u horizontalnim krivinama, te se implementiranjem ovakvog sustava kontinuiranog praćenja vibracija vozila nudi mogućnost ranog otkrivanja propadanja i drugih nepravilnosti na kolosijeku.



**Slika 11.** Određivanje nagiba karoserije vozila pomoću žiroskopa brzine kotrljanja ( $gyro\_x$ ) i podataka o bočnom ubrzanju prikupljenih putem pametnih telefona unutar vozila [16]

Dobivenim kvalitetnim povratnim informacijama u području mjerenja udobnosti vožnje, počela se implementirati ideja primjene senzora pametnih telefona kao moguća metoda procjene kvalitete geometrije kolosijeka.

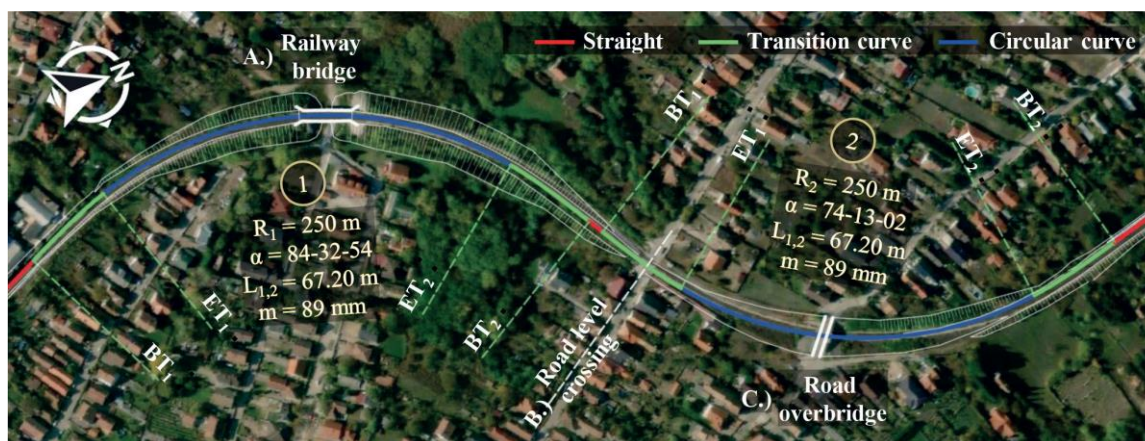
Saznanja i upućenost u rad senzora pametnih telefona u prethodnim istraživanjima, Vinkó Á. i sur. [17] iskoristili su za testiranje valjanosti i pouzdanosti korištenja pametnih telefona u procjeni geometrije željezničke pruge. Istraživanje je provedeno

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

na rekonstruiranoj željezničkoj pruzi u Mađarskoj (**Slika 12**) na brdovitom terenu što rezultira trasom širokog raspona nagiba i krivinama malog radijusa, te je čini idealnom za provedbu ispitivanja točnosti inercijskih senzora pametnog telefona u raznim situacijama. Mjerenje geometrije vršeno je putem TRV vozila za snimanje geometrije opremljenog beskontaktnim, optičkim sustavom za mjerenje geometrije trase (TGMS) i sustavom mjerenja dinamike vozila (TDMS) sa uključenim akcelerometrima, te pametnim telefonima postavljenim unutar samog vozila za kvalitetniju usporedbu putem sinkroniziranih mjerenja.

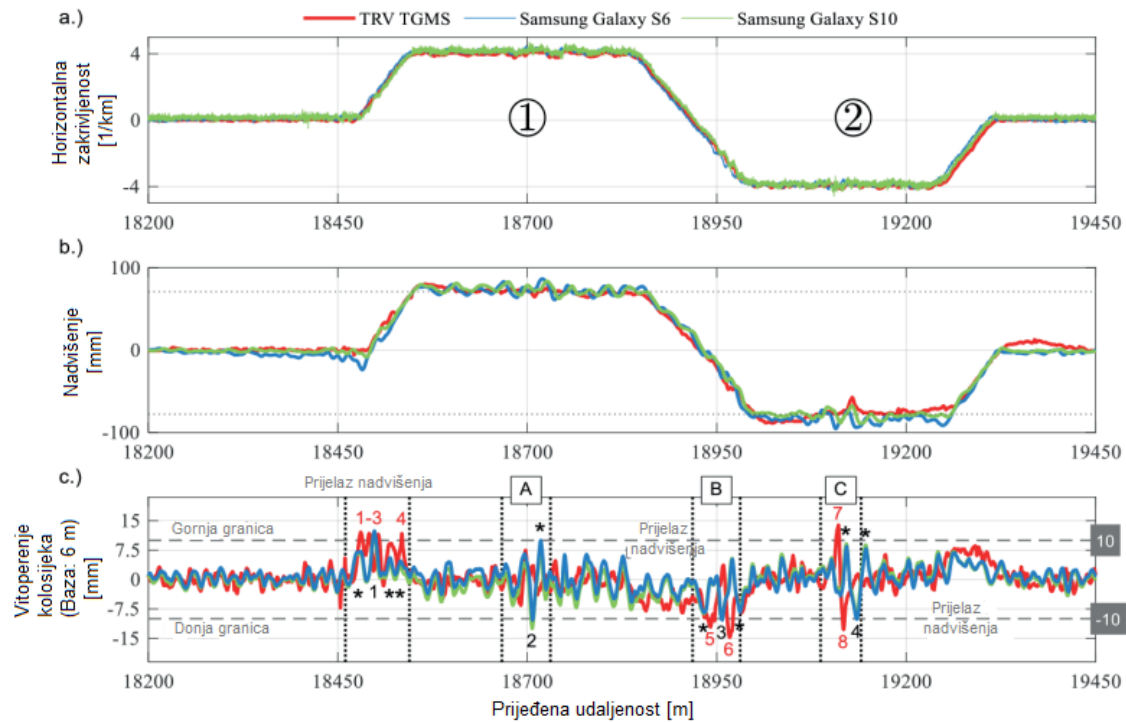


**Slika 12.** Tlocrtni prikaz ispitivane dionice pruge, s naglaskom na parametre trase i važne strukture duž pruge [17]

Uz uvažavanje karakteristika vozila, te mjerenjem pravilnih i nepravilnih kretanja karoserije, dobivena je mogućnost procjene parametara geometrije kolosijeka. **Slika 13** prikazuje zakrivljenost, nagib i vitoperenje trase (na duljini baze od 6 m) koje su izmjerene TRV vozilom, sinkronizirane s obrađenim podacima mjerenja pametnih telefona. Prijeđena udaljenost dobivena je sinkronizacijom vremenskih podataka između dva mjernih uređaja, dok je nagib trase procijenjen preko kompenziranog nagiba karoserije, izračunatog zabilježenim podacima inercijalnog senzora pametnog telefona te sinkroniziranih podataka o brzini TRV vozila. Na temelju tehnika kinematičke analize određen je koeficijent fleksibilnosti kotrljanja vozila, što je omogućilo izračun visinskog odnosa tračnica i vitoperenja kolosijeka.

Ovaj rad pokazuje mogućnost pametnih telefona u nadopunjavanju upravljanja željezničkim sustavima zbog pouzdane osjetljivosti njihovih ugrađenih inercijalnih senzora. Također je pokazao i mogućnost mjerenja brzine skretanja i nagiba vozila od

nekoliko desetinki stupnjeva korištenjem žiroskopa pametnih telefona, što omogućuje otkrivanje većih promjena u nagibu trase.



**Slika 13.** Rezultati izračunati iz podataka senzora pametnih telefona i uspoređenih s TRV vozilom koje snima kolosijek: a) horizontalna zakrivljenost; b) izračunato i izmjereno nadvišenje kolosijeka; c) izračunato i izmjereno vitoperenje kolosijeka preko 6 m baze [17]

Potaknuti svim dosadašnjim istraživanjima te konstantnim napredovanjem i razvojem senzora unutar pametnih telefona, u nastavku ovoga rada provedeno je istraživanje i zapažanja na dionicama zagrebačkog tramvajskog sustava .

## 5. Prikupljanje podataka

Za analizu kvalitete geometrije kolosijeka provedeno je mjerenje geometrije i ocjena udobnosti vožnje na tramvajskoj mreži grada Zagreba u travnju 2023. godine, koristeći mjerna kolica TET-1000 i podatke zabilježene u tramvajskom vozilu.

Zagrebačka tramvajska mreža sastoji se od ukupno 116 km uskotračne operative tramvajske pruge (što ne uključuje manevarske i servisne kolosijeke), a širina kolosijeka na svim dijelovima iznosi 1000 mm. Tramvajskom prugom obuhvaćeni su gotovo svi dijelovi zagrebačkog gradskog područja. Konfiguracija pruge varira od otvorenih dionica sa zasebnim tramvajskim koridorom gdje se vozila kreću brzinom i do 50 km/h, preko dionica kolosijeka obloženih betonskim blokovima u polu odvojenim koridorima (kojima se kreću samo tramvaji i servisna vozila), pa do dionica u središtu grada s oštrim zavojima, kolosijekom obloženim betonom i asfaltnim habajućim slojem, gdje prometnu površinu tramvaji dijele s cestovnim vozilima, a prosječna brzina prometovanja iznosi 10 km/h [12].

Prikupljanje podataka, tj. mjerenje geometrije je provedeno na dvije dionice: *Mihaljevac-Gračansko dolje* i *Mihaljevac-Grškovićeve*. Odabrane ispitne dionice po svojim karakteristikama vjerno predstavljaju glavninu tramvajske mreže u Zagrebu, a odlikuje se različitim konfiguracijama kolosijeka i obloge. Prilikom odabira mjernih dionica uzet je u obzir i period eksploatacije, te same rekonstrukcije. U narednim potpoglavljima detaljno su opisane mjerene dionice, te mjerenje i prikupljanje podataka s mjernih kolica i unutar tramvajskih vozila.

### 5.1. Opis mjerenih dionica

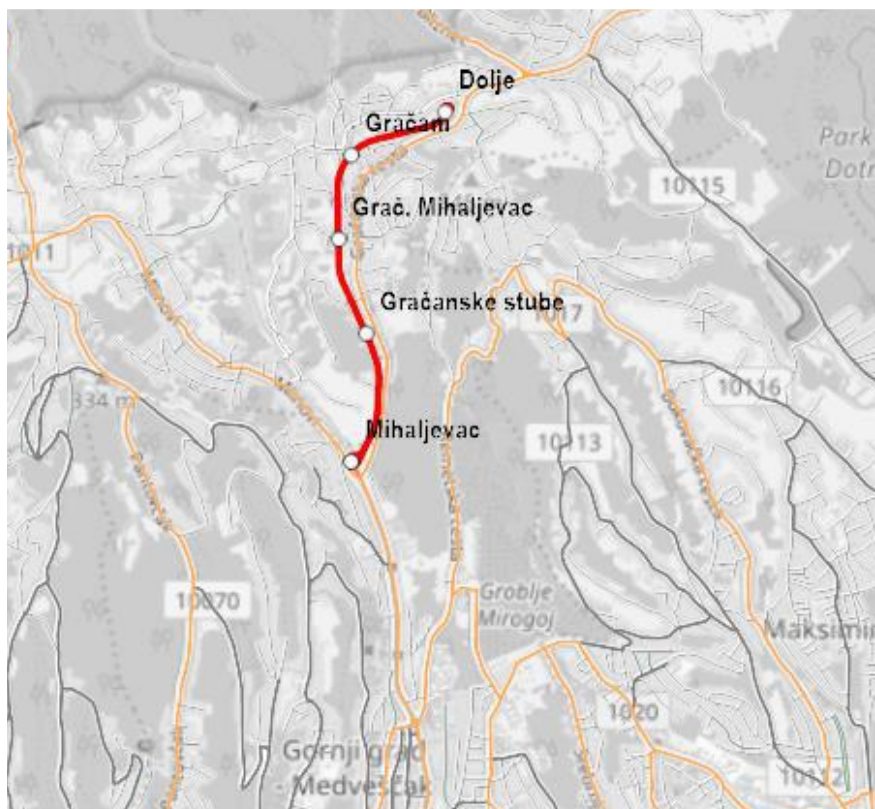
Dionica 1, ukupne duljine 5.10 km, prostire se od okretišta Mihaljevac do okretišta Gračansko dolje (**Slika 14**) te predstavlja tramvajsku liniju broj 15. Trasa tramvajske linije položena je u samostalnom koridoru, poviše Gračanske ceste od okretišta Mihaljevac do okretišta Dolje, te uglavnom leži u blagom zavoju s  $R > 500$  m ili je položena na pravcu, a

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

uzdužni nagib varira do najviše 60 ‰. Cijelom svojom duljinom kolosijek je položen na tucanik, izuzev željezničko-cestovnih prijelaza. Ova dionica odabrana je zbog svoje nedavne rekonstrukcije. Ispitivanje je vršeno u oba smjera, tj. na istočnom i zapadnom kolosijeku. S time rečenim dionicu možemo podijeliti na dvije poddionice: *Mihaljevac-Gračansko dolje* (istočni kolosijek) i *Gračansko dolje-Mihaljevac* (zapadni kolosijek).



**Slika 14.** Trasa tramvajske linije 15 Mihaljevac – Dolje [18]

Dionica 2, ukupne duljine 5.18 km, prostire se od okretišta Mihaljevac do stanice Grškovićeve (križanje Ulice Nike Grškovića i Medveščak ulice) te je prikazana na **Slici 15**. Sastavni je dio dnevnog prometovanja dviju tramvajskih linija : broj 8 (Mihaljevac-Zaprude) i broj 14 (Mihaljevac-Savski most). Kao i prva dionica, većinskim dijelom kolosijek je položen u samostalnom koridoru na tucaniku osim na željezničko-cestovnim

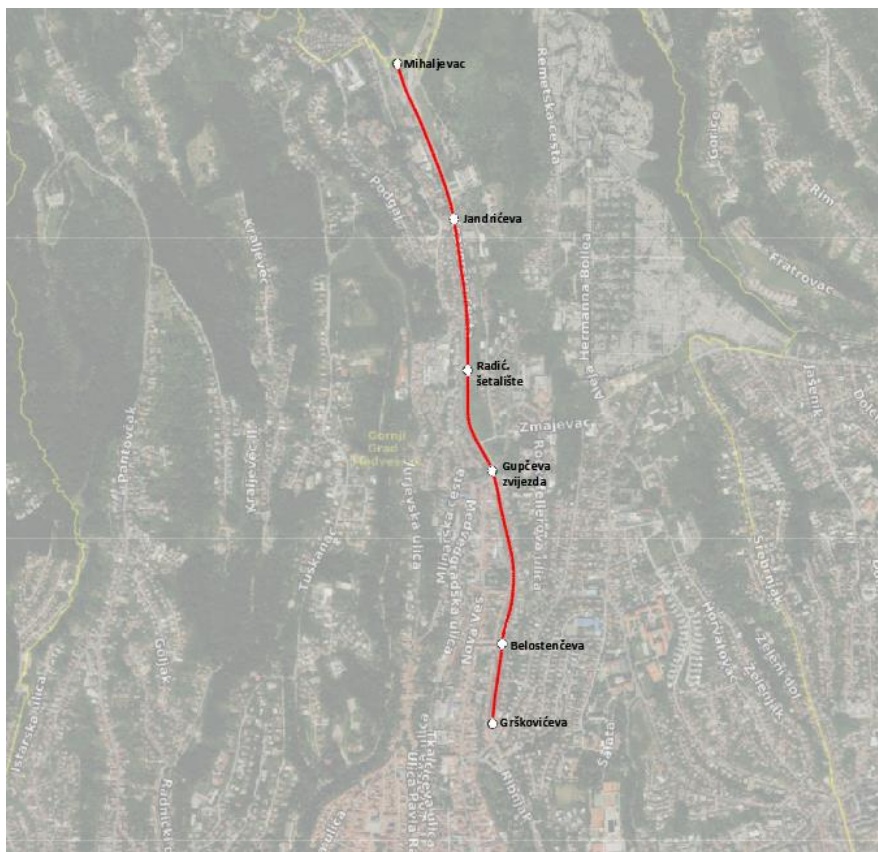
Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**



prijelazima. Trasa je uglavnom položena na pravcu ili leži u blagom zavoju. Ispitivanje dionice vršeno je također u oba smjera, tj istočnom i zapadnom kolosijeku te je s toga možemo podijeliti na dvije poddionice: *Mihaljevac-Grškovičeva* (zapadni kolosijek) i *Grškovičeva-Mihaljevac* (istočni kolosijek).



**Slika 15.** Prikaz dionice 2: *Mihaljevac-Grškovičeva*

## 5.2. Mjerenje geometrije mjernim kolicima TEC-1000

Mjerenje kolosiječne geometrije (**Slika 18**) provedeno je 25. travnja 2023. godine pomoću mjernih kolica TEC-1000 proizvođača P.U.T. GRAW sp. z o.o. (**Slika 16**) za kolosijeke širine 1000 mm. Riječ je o uređaju za ručno kontinuirano mjerenje geometrije kolosijeka čiji mjerni elementi uključuju induktivne linearne senzore gibanja za mjerenje širine

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

kolosijeka, vertikalnih i horizontalnih nepravilnosti kolosijeka, te elektroničku iglu za mjerenje nadvišenja. Vitoperenje kolosijeka izračunava se tijekom mjerenja kao algebarska razlika između dviju uzastopnih vrijednosti nadvišenja međusobno udaljenih 10 m (5 m ispred i 5 m iza mjernog poprečnog presjeka). Konstrukcija mjernih kolica sastoji se od poprečne i uzdužne grede, oslonjene na tri valjka, te upravljačke jedinice („data logger“) [19]. Prikaz konstrukcije mjernih kolica i položaja senzora za mjerenje nadvišenja, vertikalnih i horizontalnih nepravilnosti prikazano je na **Slici 17**.

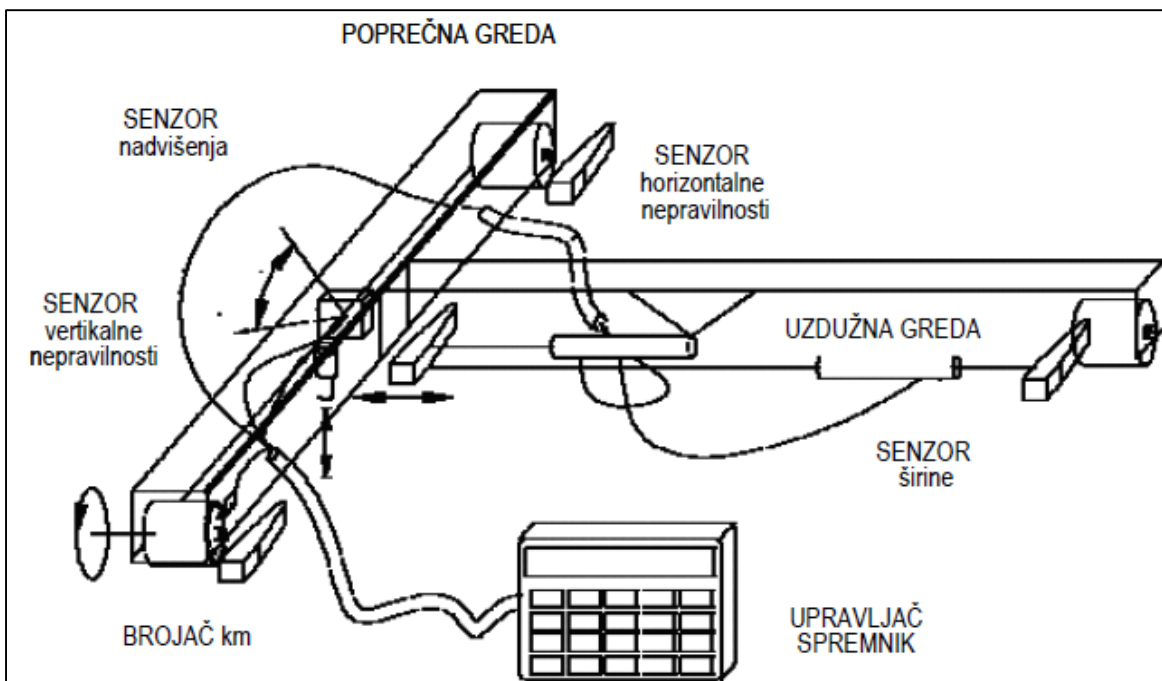


**Slika 16.** Mjerna kolica TEC-1000

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**



*Slika 17. Prikaz konstrukcije mjernih kolica i položaja senzora [6]*

Osim što ih odlikuje jednostavnost upotrebe i modularni dizajn koji omogućuje lako rukovanje i transport, mjerna kolica TEC pružaju mogućnost automatskog bilježenja rezultata mjerenja u elektroničku memoriju u stvarnom vremenu kao i GPS podataka, te dodatnih karakterističnih pojava kao što su zavari tračnica, potrebna zamjena pragova, itd. Prilikom mjerenja uz već navedene parametre, dodatno su zabilježene stacionaže zavara, početnih i krajnjih točaka tramvajskih stajališta, kao i željezničko-cestovnih prijelaza. Svi zabilježeni podaci preko upravljačke ploče preneseni su na računalo putem USB-a, te zatim preko specijaliziranog Track Gauge softvera izvezeni u Excel format radi jednostavnije preglednosti. Podaci o parametrima geometrije kolosijeka analiziranih dionica zabilježeni putem mjernog uređaja prikazani su u **Prilogu 1**.

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**



**Slika 18.** Mjerenje geometrije TEC-1000 ručnim kolicima

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

### 5.3. Prikupljanje podataka pametnim telefonima

Prije provedbe ispitivanja na opisanim dionicama kolosijeka, tramvajsko vozilo iz redovnog prometa opremljeno je mjernom opremom za snimanje vibracija. Prijenosno računalo i troosni akcelerometar smješteni su u putnički prostor zajedno s dva pametna telefona i jednim za praćenje GPS lokacije. Za mjerenje su korištena 2 pametna telefona marke Samsung: jedan modela SM-G955F, te jedan modela SM-A528B. Njihove specifikacije procesora te frekvencije njihovog rada (**Slike 19 - 22**) su sljedeće:

- Samsung SM-G955F, Procesor: 2.3GHz Octa-Core processor ,Frekvencija: 500 Hz



**Slika 19.** Specifikacije Samsung SM-G955F uređaja



**Slika 20.** Frekvencija Samsung SM-G955F uređaja

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

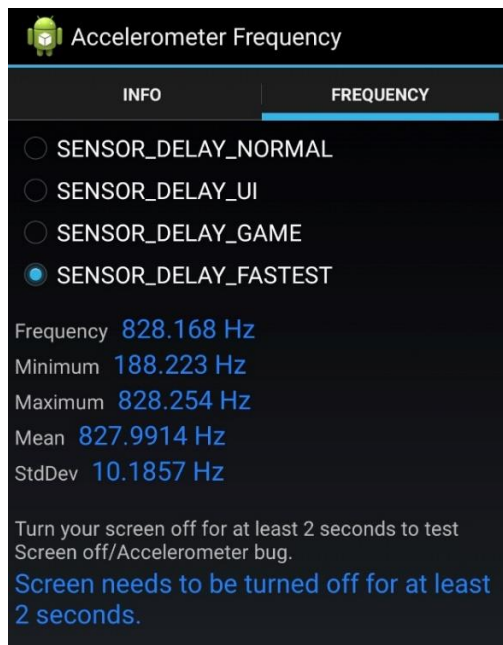
Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

- Samsung SM-A528B, Procesor: 2.4 GHz Octa-Core processor, Frekvencija: 828 Hz

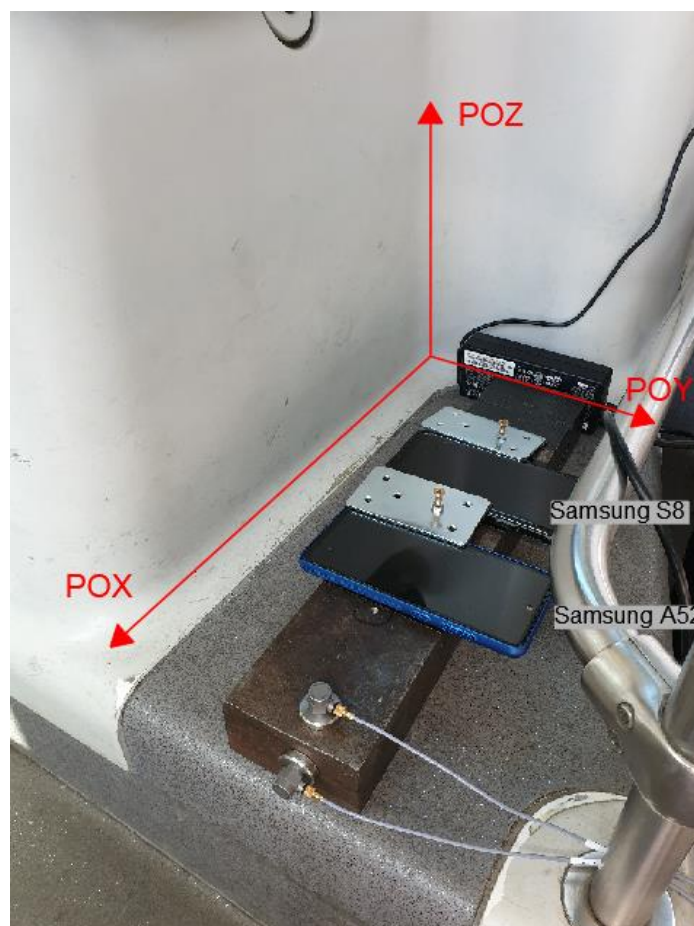


**Slika 21.** Specifikacije Samsung SM-A528B uređaja



**Slika 22.** Frekvencija Samsung SM-A528B uređaja

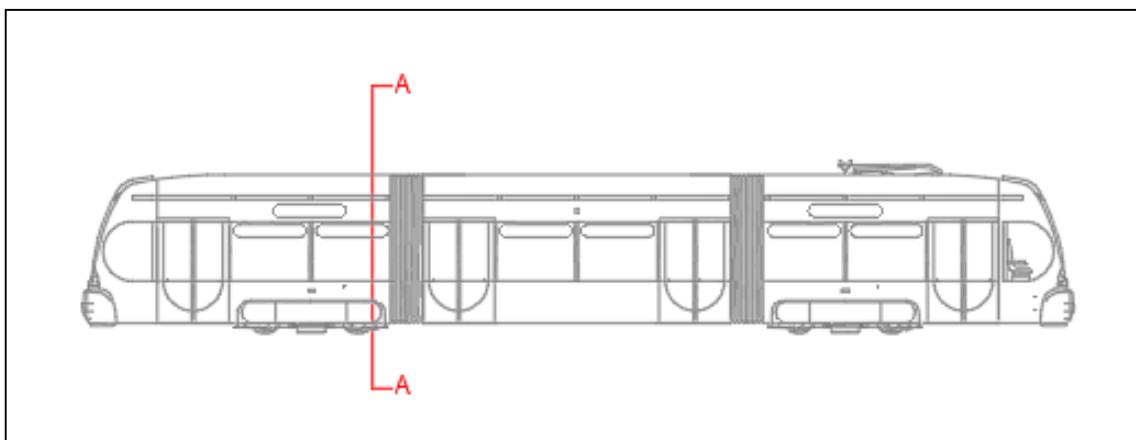
Prilikom mjerenja, telefon se postavlja na svoju dužu stranu pričvršćenu za čeličnu podlogu tramvaja (**Slika 23**) koja djelomično filtrira komponente više frekvencije, ali zadržava niske frekvencije koje se odnose na nepravilno oscilatorno kretanje vozila, te je postavljen na pod tramvaja na drugo tj. srednje okretno postolje, ovisno u tipu. U korištenom mjernom rasporedu, os 'y' bilježi uzdužno ubrzanje, os 'x' je poprečno ubrzanje, dok os 'z' bilježi okomito ubrzanje. Za bilježenje podataka senzora pametnih telefona korištena je aplikacija "IMU+GPS-Stream", koja ujedno bilježi podatke u datoteku s vrijednostima odvojenim zarezima (CSV datoteka) i time olakšava obradu podataka.



**Slika 23.** Položaj pametnih telefona u putničkom prostoru i položaja osi mjerenja akceleracija

Prikupljanje podataka na dionici 1 (Mihaljevac-Gračansko dolje) vršilo se unutar vozila TMK 2300, točnije TMK 2302 - linija 15. Duljina trase (u jednom smjeru) iznosi 2.60 km i sastoji se od 5 stajališta: Mihaljevac (okretište), Gračanske stube, Grač. Mihaljevac, Gračani i Dolje (okretište). Prosječna udaljenosti između tramvajskih stajališta iznosi 680 metara [18]. Na **Slici 24** prikazana je lokacija uređaja koji su bili postavljeni unutar tramvaja TMK 2302 s obzirom na položaj zaokretnog dijela tramvaja. Na ovoj dionici mjerni uređaji su bili postavljeni na drugo okretno postolje s lijeve strane.

Tramvajsko vozilo tipa TMK 2300 predstavlja kraću verziju vozila TMK 2200. Motorna kola podijeljena su u tri međusobno zglobno povezana modula. Duljina tramvajskih vozila tipa TMK 2300 iznosi 20.740 mm, širina vozila je 2.300 mm, a visina iznosi 3.700 mm. Tramvajsko vozilo ima ukupno 150 mjesta, od čega 27 sjedećih i 123 sjedećih mjesta. Tramvajska motorna kola imaju ukupno četiri osovine, a pogonjena su sa četiri asinkrona motora, minimalne snage od 65 kW. Maksimalna brzina tramvajskog vozila iznosi 70 km/h uz najveće ubrzanje od 1,1 m/s<sup>2</sup> [18].



**Slika 24.** Lokacija mjernih uređaja unutar TMK 2300

Mjerenje na dionici 2 (Mihaljevac-Grškovićeve) vršilo se unutar vozila TMK 2200, točnije TMK 2276 - linija 8. Duljina dionice (u jednom smjeru) iznosi 2.59 km i sastoji se od ukupno 6 stajališta kako slijedi: Mihaljevac (okretište), Jandrićeva, Radić. šetalište, Gupčeva zvijezda, Belostenčeva, Grškovićeve. Prosječna udaljenosti između tramvajskih stajališta iznosi 520 metara [18]. Na **Slici 25** prikazana je lokacija

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

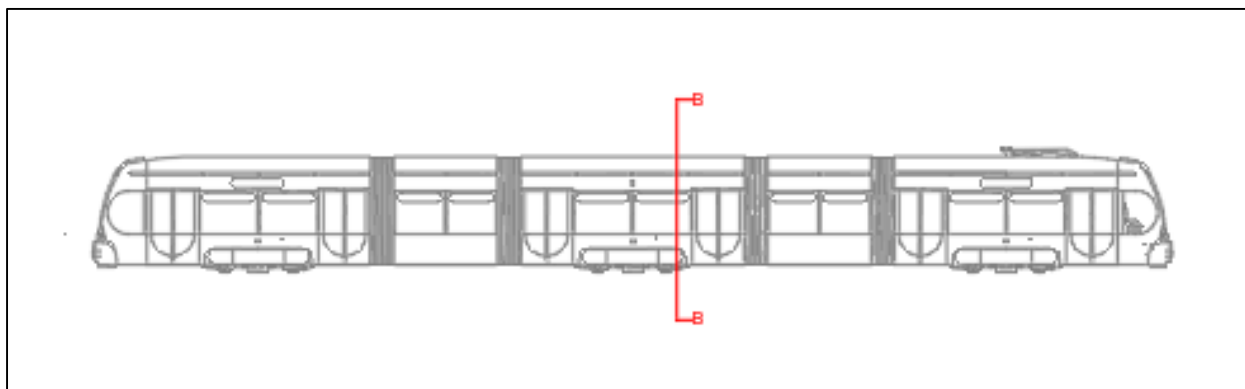
Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**



uređaja koji su bili postavljeni unutar tramvaja TMK 2276 s obzirom na položaj zaokretnog dijela tramvaja. Na ovoj dionici mjerni uređaji su postavljeni na srednje okretno postolje s lijeve strane.

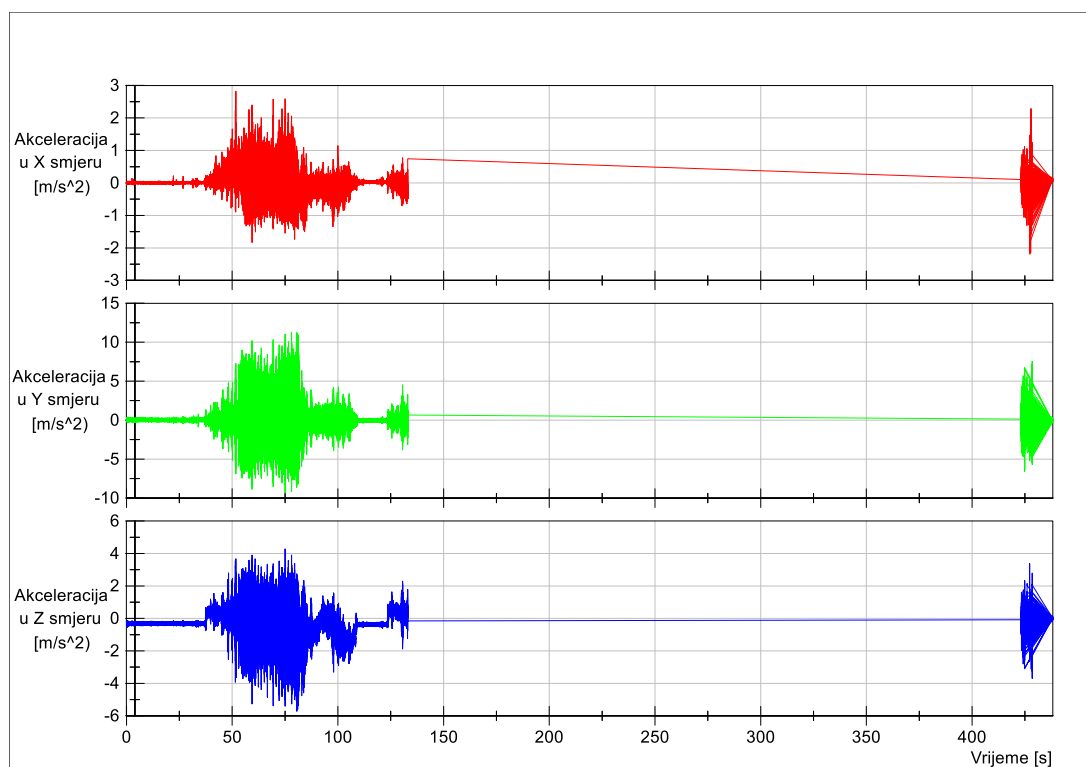
Tramvajsko vozilo TMK 2200 sastoji se od pet segmenata međusobno povezanih sa četiri zgloba. Dužina tramvaja iznosi 32.038 mm, širina je 2.300 mm, a visina iznosi 3.700 mm. Tramvajsko vozilo ima ukupno 282 mjesta, od čega 41 sjedeće i 241 sjedeće mjesto. Motorna kola imaju 6 osovina, a pokretana su sa šest asinkronih motora, minimalne snage 65 kW. Maksimalna brzina tramvajskih motornih kola iznosi 70 km/h uz najveće ubrzanje od 1,1 m/s<sup>2</sup> [18].



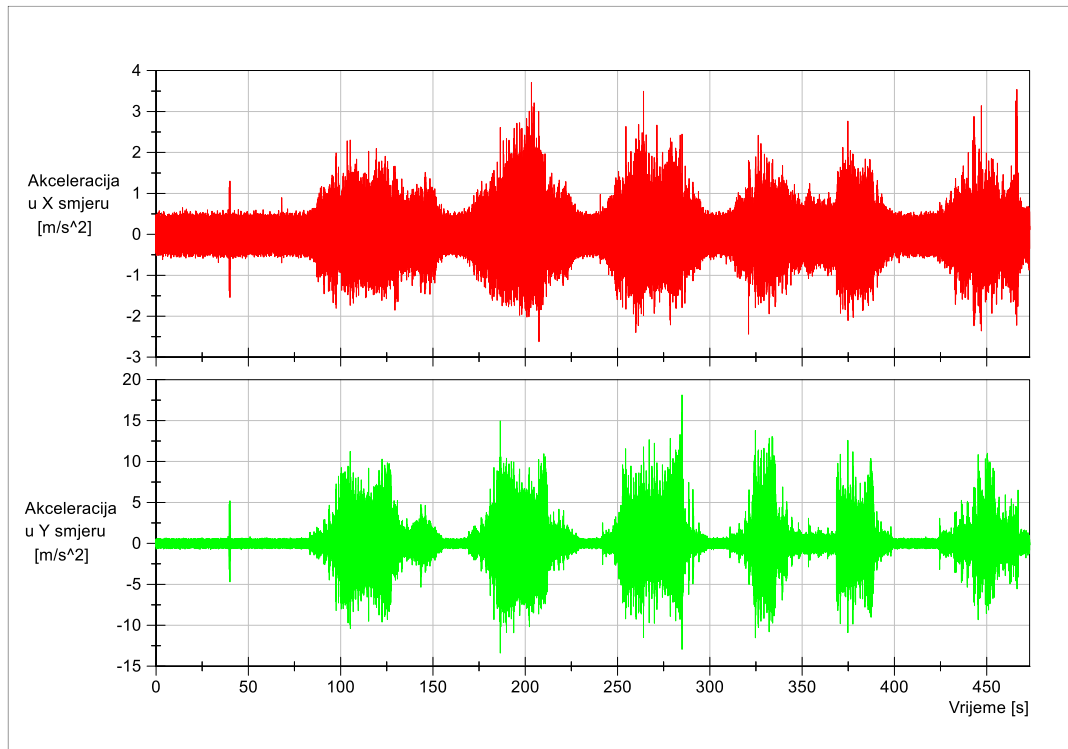
**Slika 25.** Lokacija mjernih uređaja unutar TMK 2200

## 6. Analiza podataka

Zabilježeni podaci prilikom mjerenja pametnim telefonima unutar tramvaja, na oba mobilna uređaja, pokazali su se nedovoljno kvalitetni za obradu na cijelom vremenskom intervalu tj. na cijelim dionicama/poddionicama zbog velike isprekidanosti u snimanju (**Slika 26**), što je predstavljalo svojevrsan problem prilikom obrade podataka. Gubitak podataka rezultat je neoptimizirane mobilne aplikacije za prikupljanje podataka, te bi podaci dobiveni specijaliziranom aplikacijom upravo za ovu namjenu, kao što je CAFat sa Sveučilišta u Budimpešti, kvaliteta prikupljanja podataka bila znatno bolja. Zbog toga se analiza udobnosti vožnje izvršila na svakoj poddionici u intervalu od 40 s i uspoređivala sa kontinuiranim podacima dobivenim akcelerometrom (**Slika 27**). Analizu parametara geometrije iz istog razloga nije bilo moguće sistematično provesti na cijelim dionicama. U **prilogu 2** prikazani su podaci mjereni senzorima pametnih telefona.



**Slika 26.** Vremenski zapis akceleracija u X, Y i Z smjeru na poddionici Gračansko Dolje-Mihaljevaca snimljen Samsung A52 uređajem



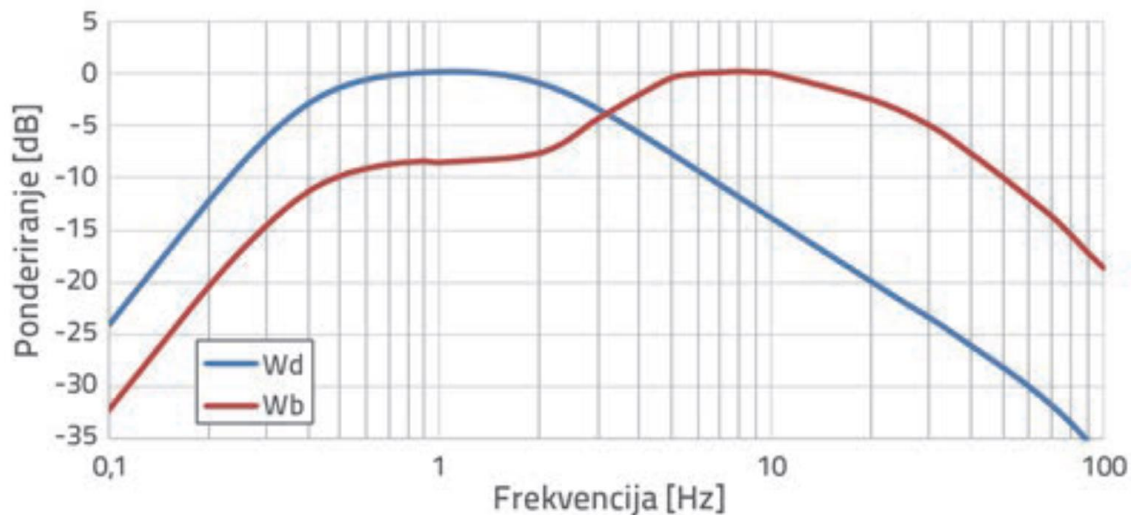
**Slika 27.** Vremenski zapis akceleracija u X i Y smjeru na poddionici Gračansko Dolje-Mihaljevac snimljen umjerenim akcelerometrom klase 1 (cDAQ)

### 6.1. Analiza udobnosti vožnje

Prikupljanje podataka za udobnost vožnje provedeno na dvije dionice: *Mihaljevac-Gračansko dolje* i *Mihaljevac-Zaprudje*, točnije na ZET tramvajskim linijama 15 i 8.

Za analizu udobnosti vožnje obrađeni su podaci izmjereni mobilnim uređajima za pojedinu mjernu dionicu, te uspoređeni s podacima dobivenim akcelerometrom. Podaci su obrađeni na temelju metode kontinuirane udobnosti, koju smo opisali ranije, u dva smjera (POZ i POX).

Vibracije su analizirane u frekventijskom području primjenom krivulja za ponderiranje koje su zadane u normi EN 12299. Predložena je krivulja za ponderiranje  $W_b$  (za vertikalni smjer) i krivulja za ponderiranje  $W_d$  (za uzdužni i bočni smjer).  $W_d$  se temelji na normi ISO 2631-1 dok je  $W_b$  neznatno modificirana krivulja koja se predlaže u normi ISO 2631-4 te koja je definirana u normi EN 12299 [12]. Krivulje za ponderiranje prikazane su na **Slici 28**.



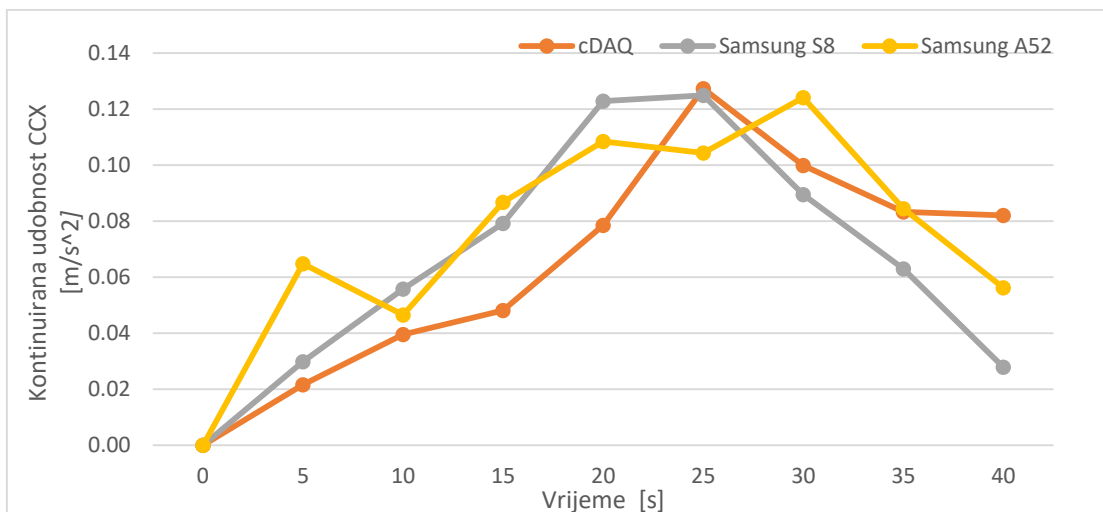
**Slika 28.** Ponderirane krivulje za uzdužni, bočni (Wd) i vertikalni smjer (Wb) [12]

### 6.1.1. Dionica 1: Mihaljevac-Gračansko Dolje

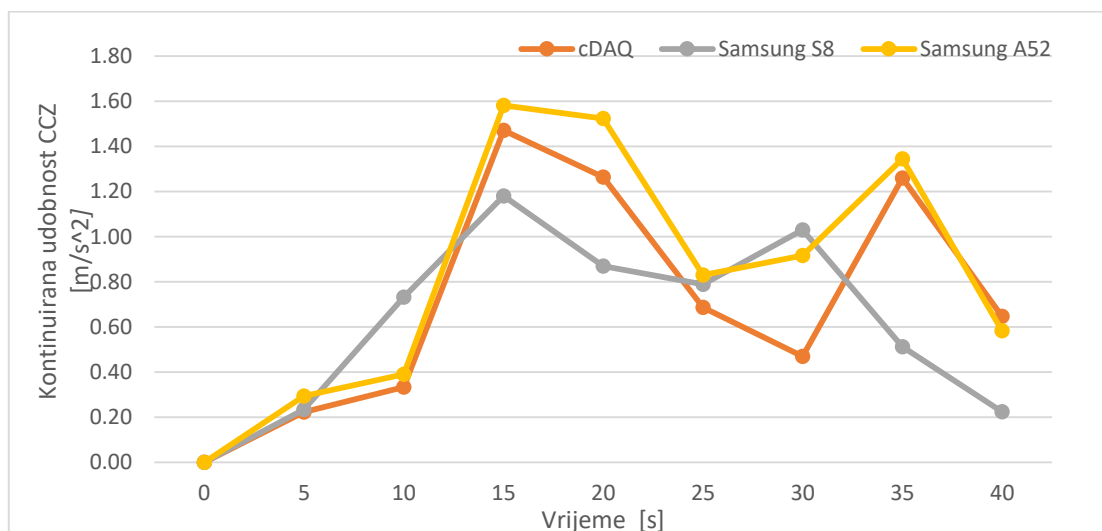
Dionica *Mihaljevac-Gračansko Dolje* prilikom mjerenja podijeljena je na dvije poddionice. Svaka od njih zasebno je obrađena te su rezultati navedeni u nastavku rada. Na ovoj dionici zabilježene su veće razine kontinuirane udobnosti i frekvencije signala što je pretpostavljeno da je uzročnik tome pozicija mjernih uređaja. Mjerenje na ovoj dionici vršilo se na krećem tramvaju (TMK 2300) koji ima dva okretna postolja, te su uređaji postavljeni na drugom postolju koje je ujedno i vučno postolje pa su proizvedene vibracije jače nego na drugoj dionici gdje je korišten tramvaj tipa TMK 2200.

#### Poddionica 1: Mihaljevac-Gračansko Dolje

Na ovoj poddionici kolosijeka **Slike 28** i **30** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s ocijenjena kao „manje udobna“ (prema tablici 4.). Kontinuirana udobnost u X smjeru zadovoljavajuća je i manja od  $0,20 \text{ m/s}^2$ , no zbog Z smjera gdje su izmjerene razine znatno veće (čak i do  $1,58 \text{ m/s}^2$ , snimljeno Samsung A52 uređajem) vožnja na odabranom intervalu označena je kao „manje udobna“ tj. veća od  $0,40 \text{ m/s}^2$ . Kao što se vidi i na priloženim slikama, u X smjeru podudarnosti između sva tri uređaja nisu ostvarene dok u Z smjeru postoji donekle podudarnost krivulja između akcelerometra (cDAQ) i Samsung A52 uređaja uz određeno odstupanje razina dok podaci sa Samsung S8 uređajem to nije vidljivo.



**Slika 29.** Mihaljevac-Gračansko Dolje\_X

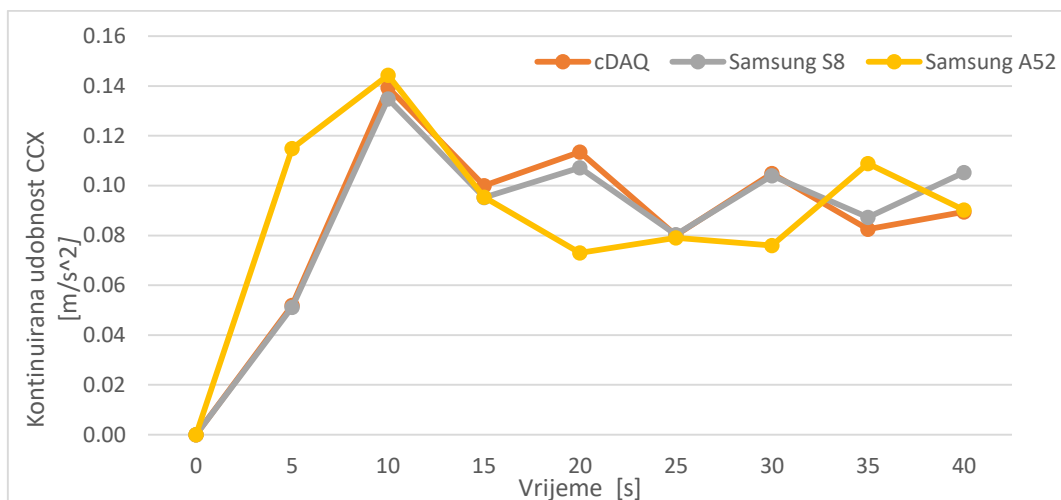


**Slika 30.** Mihaljevac-Gračansko Dolje\_Z

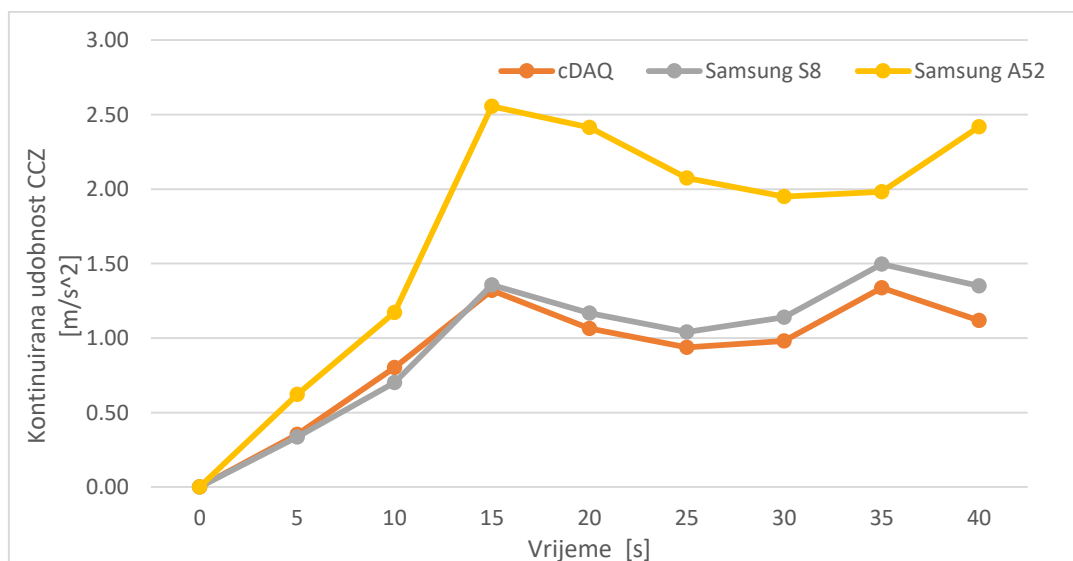
### Poddionica 2: Gračansko Dolje-Mihaljevac

Na ovoj poddionici kolosijeka **Slike 31** i **32** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s ocijenjena kao „manje udobna“ (prema tablici 4.). Kontinuirana udobnost u X smjeru zadovoljavajuća je i manja od 0,20 m/s<sup>2</sup>, no zbog Z smjera gdje su izmjerene razine znatno veće (čak i do 2,56 m/s<sup>2</sup>, snimljeno Samsung A52 uređajem) vožnja na odabranom intervalu označena je kao “manje udobna” tj. veća od 0,40 m/s<sup>2</sup>. U X smjeru kontinuirane udobnosti snimljene uređajem Samsung S8 te akcelerometrom relativno se podudaraju na cijelom intervalu, dok se

kod Samsung A52 javlja odstupanje od ostalih uređaja na određenim intervalima. U smjeru Z kontinuirana udobnost snimljena Samsung A52 uređajem veća je od druga dva uređaja uz znatno odskakanje.



**Slika 31.** Gračansko Dolje-Mihaljevac\_X



**Slika 32.** Gračansko Dolje-Mihaljevac\_Z

### 6.1.2. Dionica 2: Mihaljevac - Zaprude

Dionica Mihaljevac-Zaprude prilikom mjerenja podijeljena je na pet poddionica . Svaka od njih zasebno je obrađena te su rezultati navedeni u nastavku rada. Zbog ne

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

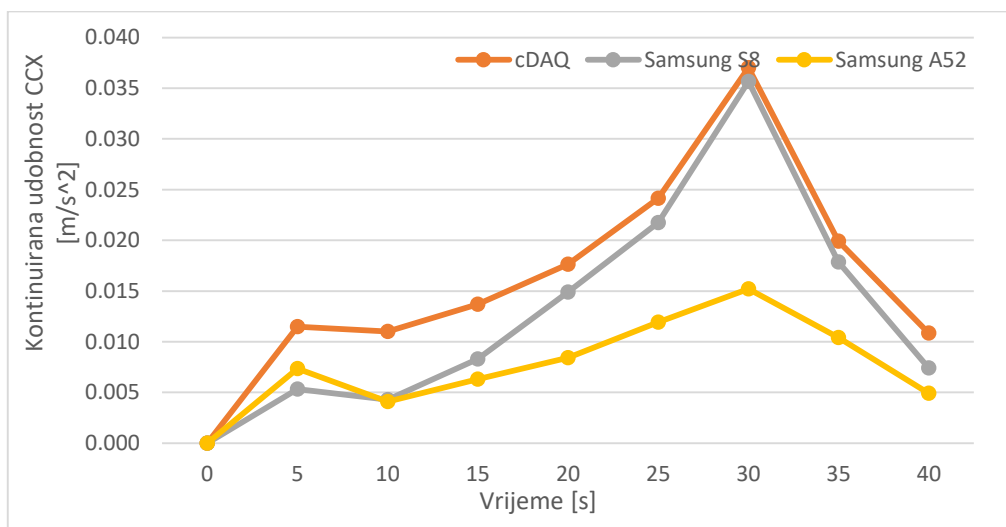
Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

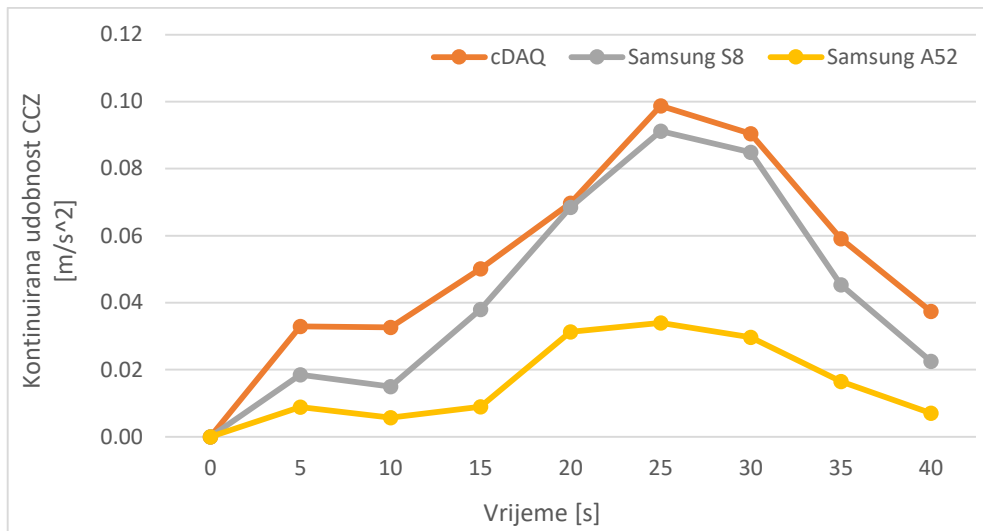
možnosti obrade cijelog signala, kao što je navedeno ranije, analizirala se i uspoređivala udobnost na 40-sekundnom intervalu snimljena sa 2 pametna telefona marke Samsung, te akcelerometrom čiji su podaci označeni sa „cDAQ“.

*Poddionica 1: Gupčeva zvijezda – križanje Branimirove i Držićeve*

Na ovoj poddionici kolosijeka **slike 33** i **34** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s ocijenjena kao „vrlo udobna“ (prema tablici 4.). Radi nedefiniranog skoka frekvencije na početnom petosekundnom intervalu, izvršeno je filtriranje snimljenog signala A52 uređajem u smjeru X ( *bandpass*, 5 – 100 Hz) kako bi se taj skok eliminirao. U X smjeru javlja se relativna podudarnost krivulja kontinuirane udobnosti za Samsung S8 i cDAQ uz neznatno odstupanje, dok Samsung A52 ima dosta niže vrijednosti na skoro cijelom vremenskom intervalu za što se kao razlog uzima prethodno filtriranje signala kako bi se eliminirao početni skok. U Z smjeru najmanja razina kontinuirane udobnosti snimljena je uređajem Samsung A52, a najveća akcelerometrom. No i dalje su te razine zadovoljavajuće s obzirom da u oba smjera ne prelaze razinu veću od  $0,10 \text{ m/s}^2$ .



**Slika 33.** Gupčeva zvijezda – križanje Branimirove i Držićeve\_X

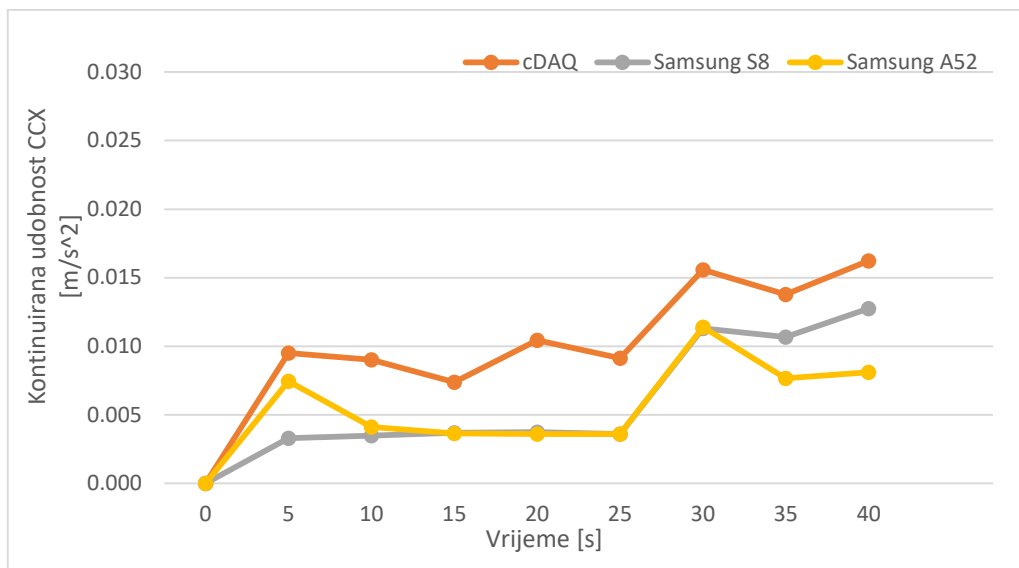


**Slika 34.** Gupčeva zvijezda – križanje Branimirove i Držičeve\_Z

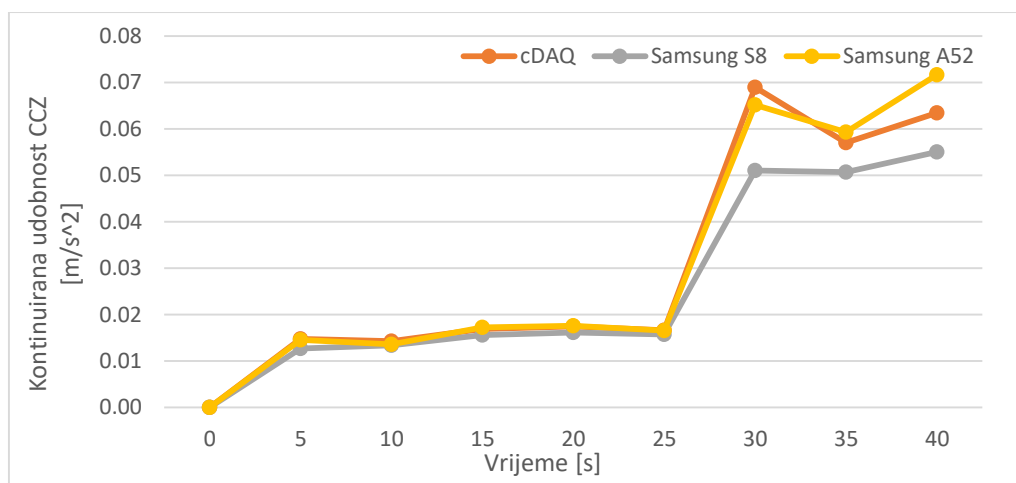
*Poddionica 2: Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Zapruđe*

Na ovoj poddionici kolosijeka **slike 35** i **36** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s ocijenjena kao „vrlo udobna“ (prema tablici 4.). Javlja se relativna podudarnost razina kontinuirane udobnosti snimljena u oba smjera sa sva tri uređaja, osim u X smjeru gdje su najveće razine kontinuirane udobnosti izmjerene akcelerometrom dok su razine snimljene mobilnim uređajima nešto niže, te u Z smjeru na intervalu od 25 do 40 s gdje je udobnost mjerena Samsung S8 uređajem manja od ostala dva korištena uređaja. Radi nedefiniranog skoka frekvencije na početnom petosekundnom intervalu, izvršeno je filtriranje snimljenog signala A52 uređajem u smjeru X ( *bandpass*, 5 – 100 Hz) kako bi se taj skok eliminirao.





**Slika 35.** Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Zapruđe\_X



**Slika 36.** Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Zapruđe\_Z

### Poddionica 3: Okretište Zapruđe - Križanje Branimirove i Držičeve

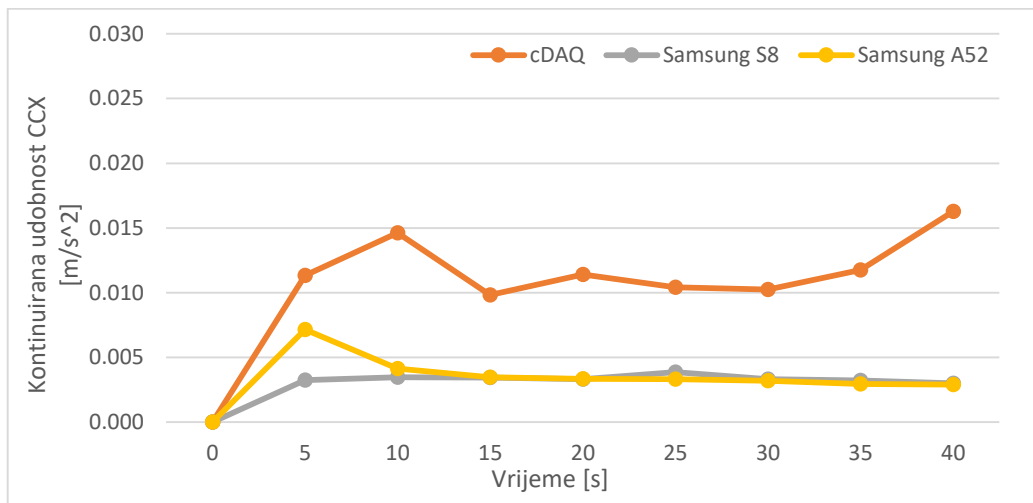
Na ovoj poddionici kolosijeka **slike 37 i 38** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s također ocijenjena kao „vrlo udobna“ (prema tablici 4.). Javlja se relativna podudarnost razina kontinuirane udobnosti snimljena u oba smjera sa sva tri uređaja u Z smjeru osim na intervalu od 30 do 40 s gdje se javlja skok kontinuirane udobnosti snimljene akcelerometrom (cDAQ). Kod kontinuirane udobnosti u X smjeru veće razine snimljene su akcelerometrom, dok su razine snimljene mobilnim uređajima nešto niže. Izvršeno je filtriranje snimljenog signala A52

Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

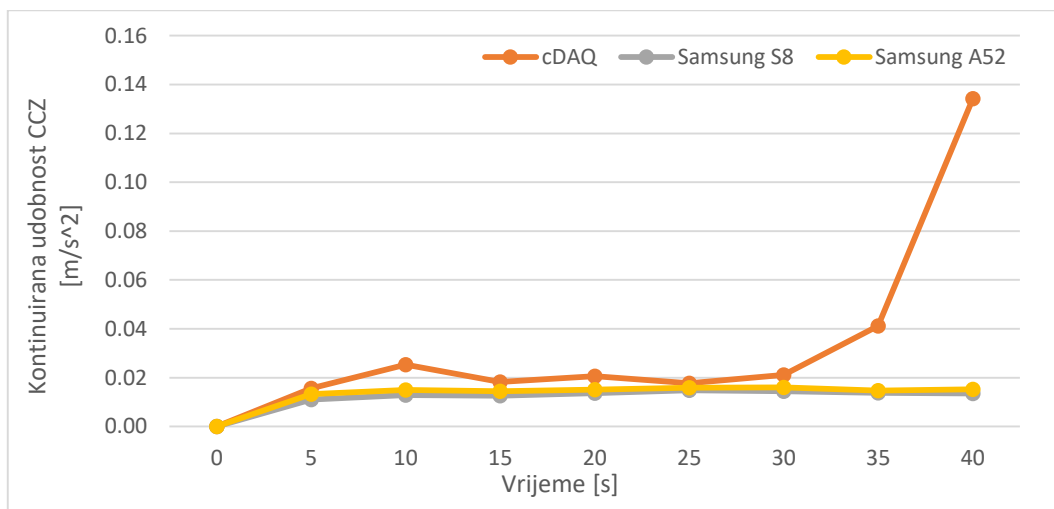
Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

uređajem u smjeru X ( *bandpass*, 5 – 100 Hz) zbog nedefiniranog skoka frekvencije na početnom petosekundom intervalu.



**Slika 37.** Okretište Zapruđe - Križanje Branimirove i Držićeve\_X

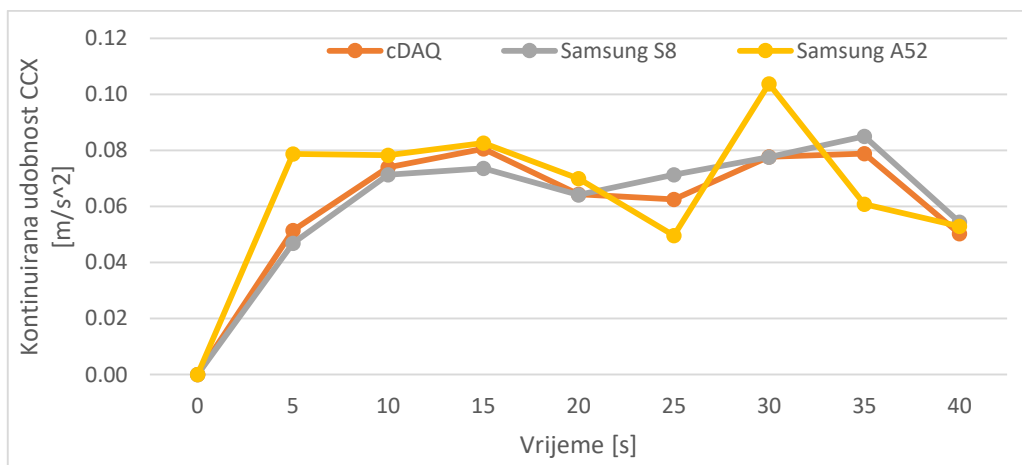


**Slika 38.** Okretište Zapruđe - Križanje Branimirove i Držićeve\_Z

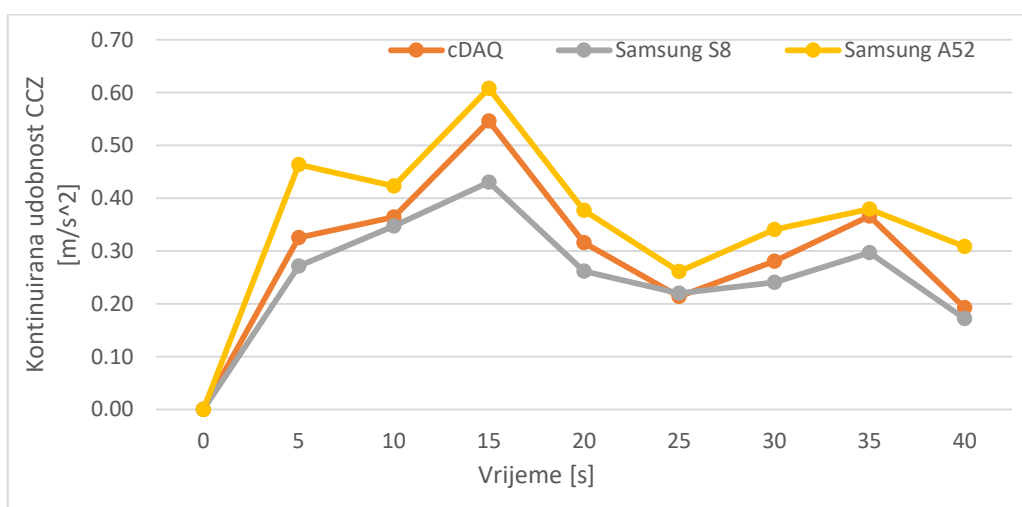
#### Poddionica 4: Križanje Branimirove i Držićeve – okretište Mihaljevac

Na ovoj poddionici kolosijeka **slike 39 i 40** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s ocijenjena kao „manje udobna“ (prema tablici 4.). U X smjeru udobnost mjerena s oba telefona i akcelerometrom su  $<0,20 \text{ m/s}^2$  što ocjenjuje vožnju kao „vrlo udobnu“, no u Z smjeru te akceleracije na određenim

intervalima premašuju granicu od  $0,40 \text{ m/s}^2$  što ocjenjuje vožnju kao „manje udobnu“. Razina kontinuirane udobnosti snimljena Samsung S8 uređajem u smjeru Z manja od udobnosti snimljene pomoću preostala dva uređaja, dok su kod Samsung A52 uređaja u oba smjera pojavljuju veći skokovi u određenim vremenskim intervalima.



**Slika 39.** Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Mihaljevac\_X

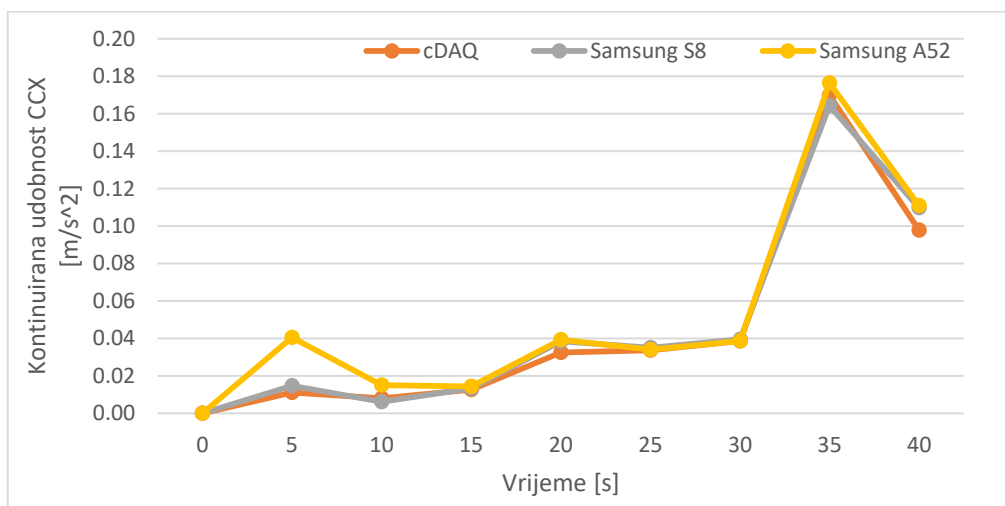


**Slika 40.** Križanje Branimirove i Držičeve – okretište Mihaljevac\_Z

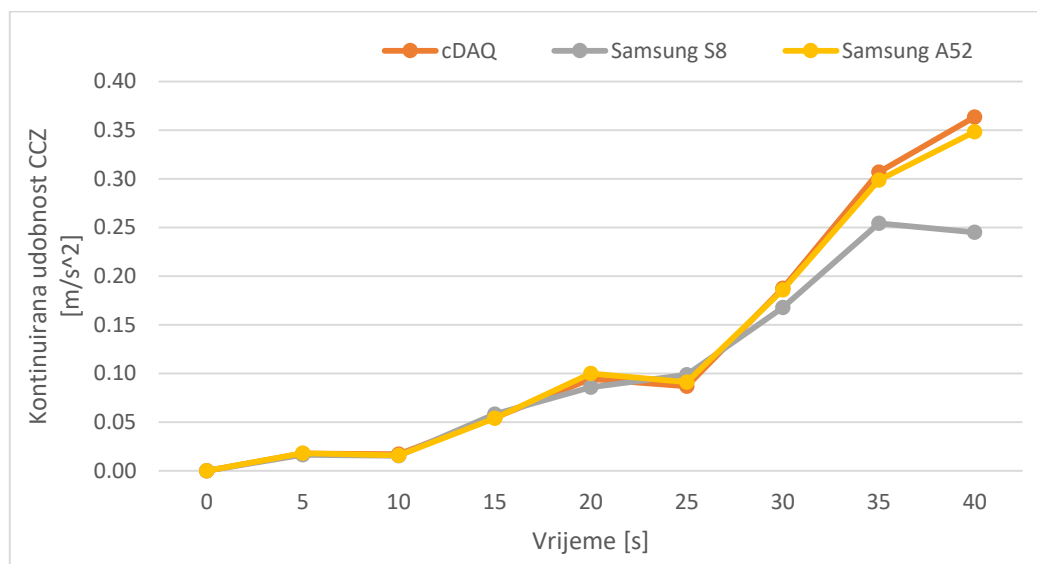
#### Poddionica 5: Okretište Mihaljevac – Ribnjak

Na ovoj poddionici kolosijeka **slike 41 i 42** prikazuju kontinuiranu udobnost, te je vožnja na odabranom intervalu od 40 s ocijenjena kao „vrlo udobna“ (prema tablici 4.) s obzirom da su na većem dijelu intervala u Z smjeru vrijednosti  $<0,20 \text{ m/s}^2$  kao i na

cijelom intervalu u X smjeru. U Z smjeru na zadnja dva peto-sekundna intervala vrijednosti kontinuirane udobnosti za sva tri uređaja nalaze se između  $0,20 \text{ m/s}^2$  i  $0,40 \text{ m/s}^2$  što označava „udobnu“ do „srednje udobnu vožnju“. Kao što se može vidjeti na priloženim grafovima, u oba smjera na sva tri uređaja javlja se podudarnost krivulja kontinuirane udobnosti uz mala odstupanja.



**Slika 41.** Okretište Mihaljevac-Ribnjak\_X



**Slika 42.** Okretište Mihaljevac-Ribnjak\_Z

## 6.2. Analiza parametara geometrije kolosijeka

Prikupljeni podaci obrađivali su se prema mjernim dionicama, tako da su se podaci zabilježeni unutar tramvaja prethodno sinkronizirali s GPS podacima te zatim uspoređivali s podacima mjerenim direktno na kolosijeku.

Za analizu parametara geometrije potrebno je bilo interpretirati podatke o ubrzanju (vibracije, orijentacija u nepomičnom položaju) i podatke žiroskopa (kretanje sanduka vozila) snimljene sensorima unutar samog vozila. Međutim, zbog ovjesa vozila podaci mjereni u sanduku vozila ne mogu se smatrati istima kao oni mjereni direktno na kolosijeku već se trebaju kompenzirati za krutost tog vozila.

### Analiza visinskog odnosa tračnica na temelju podataka žiroskopa

Digitalni žiroskop senzor je u pametnom telefonu koji daje podatke o promjeni orijentacije mobilnog telefona u vremenu u obliku kutne brzine [rad/s].

Drugi senzor koji je moguće iskoristiti za analizu visinskog odnosa tračnica je senzor orijentacije mobilnog telefona. Senzor orijentacije bilježi trenutnu orijentaciju telefona oko 3 okomite osi, tj. x – roll, y – pitch i z – yaw u stupnjevima [].

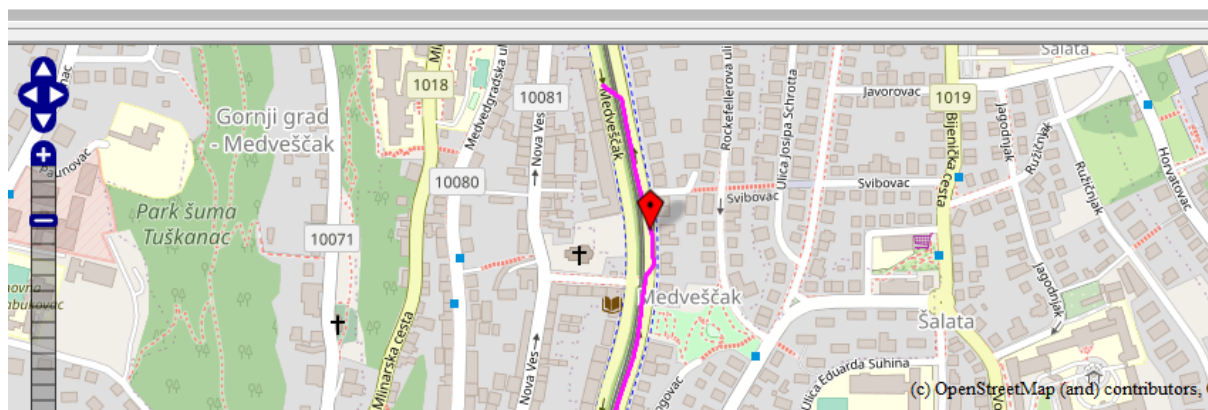
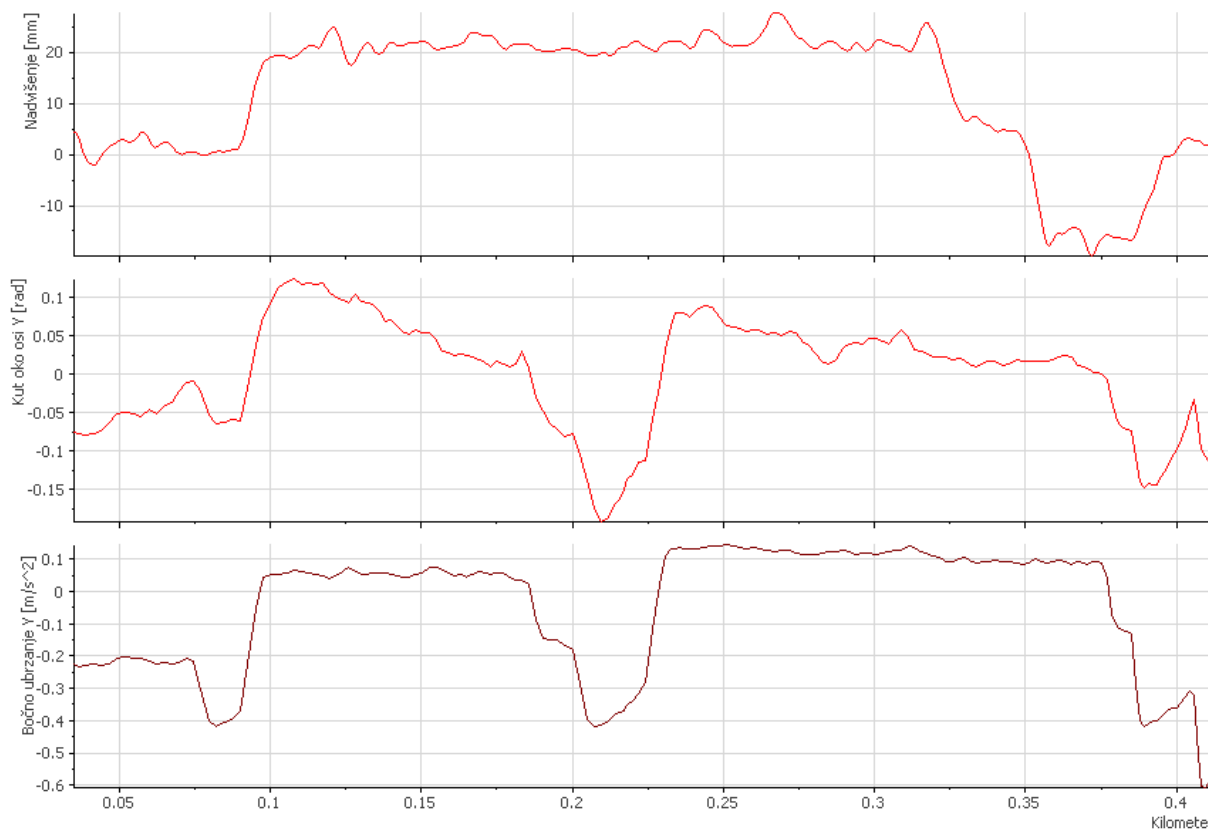
Promatrajući orijentaciju telefona oko y osi (Pitch) moguće je odrediti trenutnu poziciju zaokreta sanduka vozila (ako je mobitel postavljen u sanduku vozila).

Konačni podatak neće biti direktno izmjereno nadvišenje, ali je moguće utvrditi promjene u nadvišenju promatranjem nagiba sanduka vozila.

Na dionici tramvajske pruge od Mihaljevca do Grškovićeve ulice, promatrana je krivina radijusa 400 m duljine 216 m sa izvedenim nadvišenjem od 20 mm. U krivini su mjernim kolicima TET 1000 izmjerene vrijednosti nadvišenja tračnica (Cant) dok je pri prometovanju instrumentiranog tramvajskog vozila na mobilnom telefonu S8 zabilježen podatak o kutnoj brzini i orijentaciji mobitela.

Na temelju izmjerenih podataka vidljivo je kako je uz osnovnu obradu signala sa mobilnog telefona moguće izraziti promjenu nadvišenja.

Rezultati su prikazani na **slici 43**. Prvi dijagram predstavlja vrijednost izmjerenog nadvišenja u krivini mjeren mjernim kolicima TET 1000. Drugi dijagram prikazuju kut zaokreta sanduka vozila dobiven integracijom kutne brzine senzora žiroskopa. Treći dijagram predstavlja bočno ubrzanje sanduka vozila dobiven sa akcelerometra mobilnog telefona u sanduku vozila. Vidljivo je da kut zaokreta sanduka prati nadvišenje kolosijeka, no može se uočiti i nagla promjena zaokreta i bočnog ubrzanja na km 0+200 što može ukazivati na nepravilnosti u kolosijeku koje se bilježe mjerenjem pod opterećenjem (tramvajem), a nije ih moguće zabilježiti laganim mjernim kolicima poput TET 1000.



**Slika 43.** Prikaz promjene nadvišenja kroz krivinu, te orijentacije sanduka vozila na temelju senzora žiroskopa, te senzora orijentacije mobilnog telefona

Osnovnom provjerom nagiba i nadvišenja, **Slika 2**, moguće je ustanoviti da pri sredini krivine nagib iznosi  $1^\circ$ , dok proračunom nadvišenja možemo proračunati stvarni kut u krivini, primjenom sljedeće formule:

$$\tan \alpha = \frac{h}{1000}$$

gdje je  $h$  nadvišenje od 20 mm.

Ovom jednadžbom dolazimo do kuta  $\alpha = 1.15^\circ$  što ukazuje na dobro poklapanje mjerne metode primjenom podataka sa žiroskopa mobilnog telefona. U daljnjim

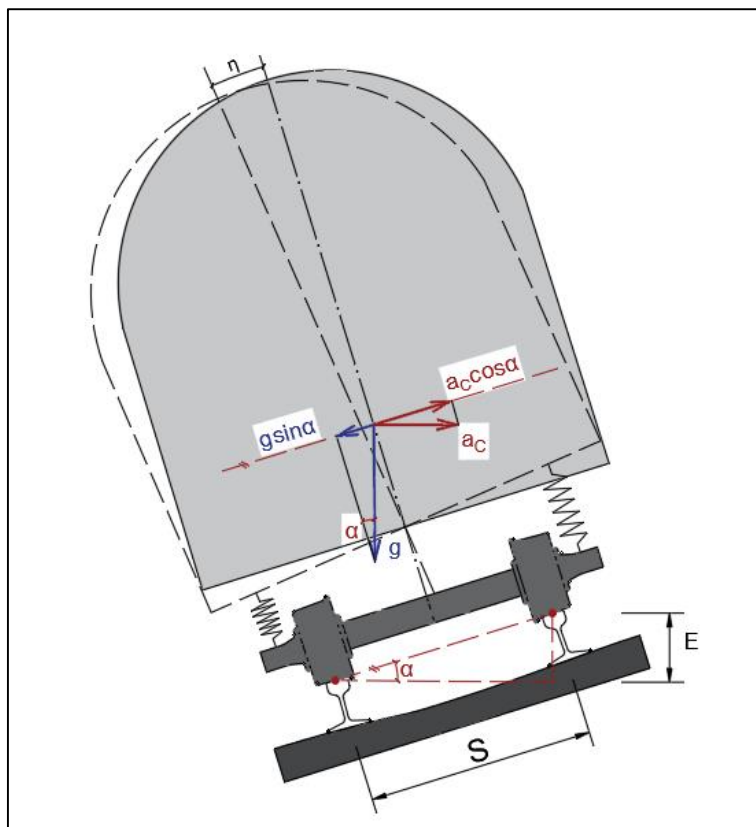
Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

Izradila: **Petra Juričev-Grđin, 0083218198**

koracima, taj kut trebalo bi kompenzirati za krutost ovjesa tramvajskog vozila kako bi se dobili točniji podaci o nadvišenju kolosijeka primjenom senzora mobilnih telefona.

**Slika 44.** prikazuje vezu između nadvišenja vozila i zaokreta sanduka u uvjetima većih nadvišenja. Kut nagiba sanduka vozila ( $\eta$ ) i kut nadvišenja kolosijeka ( $\alpha$ ) jednaki su samo ako je brzina vozila ravnotežna brzina, u svim drugim slučajevima javlja se manjak ili višak nadvišenja zbog ovjesa i fleksibilnosti sanduka vozila [17]. Usporedbom pozicioniranja mobilnih uređaja unutar vozila (**slika 23**) i grafičkog prikaza ponašanja sanduka (**slika 44.**) vidimo kako su zapravo zabilježeni podaci senzora mobilnih uređaja mjerili pokrete sanduka.



**Slika 44.** Grafički prikaz nadvišenja vozila i zaokreta sanduka vozila

## 7. Zaključak

Primjena pametnih telefona u prikupljanju podataka potrebnih za analizu stanja kolosijeka na tramvajskim kolosijecima olakšala bi proces mjerenja zbog lakše i ekonomičnije upotrebe, kao i mogućnosti mjerenja bez zatvaranja prometa. Korištenjem ugrađenih senzora poput akcelerometara, koji registriraju vibracije i nagle udare unutar mjernog vozila dobivaju se podaci iskoristivi za analizu udobnosti vožnje, dok je podatke žiroskopa i senzora orijentacije moguće primjeniti u analizi vertikalnih parametara geometrije kolosijeka (prvenstveno nadvišenja). Naravno, za provedbu ovakvih analiza potrebno je kontinuirano i točno bilježenje podataka.

Zabilježeni podaci prilikom mjerenja, na oba mobilna uređaja, pokazali su se nedovoljno kvalitetni za obradu na cijelim poddionicama zbog velikog diskontinuiteta u snimanju te gubljenju podataka, što je predstavljalo dosta velik izazov prilikom obrade a u konačnici i potpune analize svih segmenata. Prilikom obrade uočeni su i problemi s bilježenim podacima o GPS lokaciji, koji su u pojedinim trenutcima dosta odskakali od uobičajene osi kretanja, što nam je bitno prilikom povezivanja podataka s mobilnih uređaja i mjernih kolica kako bi se uspješno pozicionirali na trasi.

Unatoč diskontinuitetu prikupljenih signala vibracija i ograničavanjem obrade na segmente od samo 40 s, provedena analiza udobnosti vožnje dala je dosta zadovoljavajuće podudarnosti glede kontinuirane udobnosti vožnje. Na većem dijelu dionice 2: *Mihaljevac-Zapruđe* zabilježene su zadovoljavajuće razine kontinuirane udobnosti sa sva tri mjerna uređaja, dok su na dionici 1: *Mihaljevac-Gračansko Dolje* zabilježene veće razine kontinuirane udobnosti i frekvencije signala uz pretpostavku da je uzročnik tome pozicija mjernih uređaja. Mjerenje na ovoj dionici vršilo se na krećem tramvaju (TMK 2300) koji ima dva okretna postolja, te su uređaji postavljeni na drugom postolju koje je ujedno i vučno postolje pa su proizvedene vibracije jače nego na drugoj dionici gdje je korišten tramvaj tipa TMK 2200. Pretpostavljamo kad bi se mjerenje ponovilo s istim tramvajem koji je korišten prilikom mjerenja na drugoj dionici, kako bi ti rezultati bili zadovoljavajući s obzirom na da je to relativno novo rekonstruiran kolosijek.



Analizu geometrije kolosijeka zbog diskontinuiranih podataka s mobilnih uređaja nije bilo moguće sistematično provesti na cijelim dionicama kako bi se utvrdilo točno stanje same geometrije trase, no iz rezultata dobivenih analizom odabranih segmenata vidljiva je mogućnost detektiranja promjene nadvišenja u krivinama.

Ovo istraživanje naglašava značaj pametnih telefona kao potencijalnog novog alata za ocjenu geometrije kolosijeka i udobnosti vožnje, ali isto tako prepoznaje izazove i navedene nedostatke ovakvog pristupa. Razmatrajući sve segmente ovoga rada, od provedbe mjerenja do obrade dobivenih podataka a zatim i analize tih rezultata, nužno je naglasiti kako je potrebno svaki dio kvalitetno provesti kako bi uspješnost samog istraživanja bila što veća. A za provedbu kvalitetnije i potpune analize stanja tramvajskog kolosijeka, te udobnosti vožnje u budućim istraživanjima preporuča se poduzimanje dodatnih koraka kao što je:

- usavršavanje ili razvoj posebno prilagođene aplikacije s većom stabilnošću prikupljanja podataka, što može značajno unaprijediti točnost informacija
- korištenje već postojećih aplikacija, poput u radu opisane CAFat aplikacije sa Sveučilišta u Budimpešti, čije iskustvo i visoka kvaliteta mogu biti korisni resursi za osiguravanje pouzdanijih rezultata
- proračunavanje i identifikacija kompenzacijskih parametara za ovjes tramvajskog vozila

## Popis literature

- [1] Bocz P.; Vinkó Á., *Condition monitoring approach for the inspection of tramway track using rotating wheel mounted inertial sensors*,
- [2] Bocz P.; Vinkó Á., *Experimental Investigation on Condition Monitoring Opportunities of Tramway Tracks*,
- [3] Vinkó Á., *Monitoring and condition assessment of tramway track using in-service vehicle*,
- [4] Jovanović S. i dr., *Mjerenje i analiza stanja željezničke infrastrukture kao osnova za upravljanje održavanjem*, JCE\_66\_2014\_4\_5\_959
- [5] *EN 13848-1:2019 Railway applications – Track - Track geometry quality – Part 1: Characterisation of track geometry*, vol. 2019, 2019
- [6] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, *Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na mreži GPP-a Osijek*, Gradski prijevoz putnika d.o.o., Zagreb, 2016
- [7] *Propisnik o održavanju pruge i pružnih postrojenja*, Zagrebački električni tramvaj d.o.o., Zagreb, 1997
- [8] *EN 13848-2:2020 Railway applications – Track - Track geometry quality – Part 2: Measuring systems – Track recording vehicles*, vol. 2020., 2020.
- [9] *EN 13848-3:2022 Railway applications – Track - Track geometry quality – Part 3: Measuring systems – Track construction and maintenance machines*, vol. 2021., 2021.
- [10] *EN 13848-4:2011 Railway applications – Track - Track geometry quality – Part 4: Measuring systems – Manual and lightweight devices*, vol. 2011., 2011.
- [11] Madejski J., *Light rail, tram track and turnout geometry measurement and diagnostic tools*
- [12] Haladin I., Lakušić S., Bogut M., *Pregled i analiza metoda za ocjenu udobnosti vožnje na tramvajskim kolosijecima*, GRAĐEVINAR 71 (2019) 10, 901-921

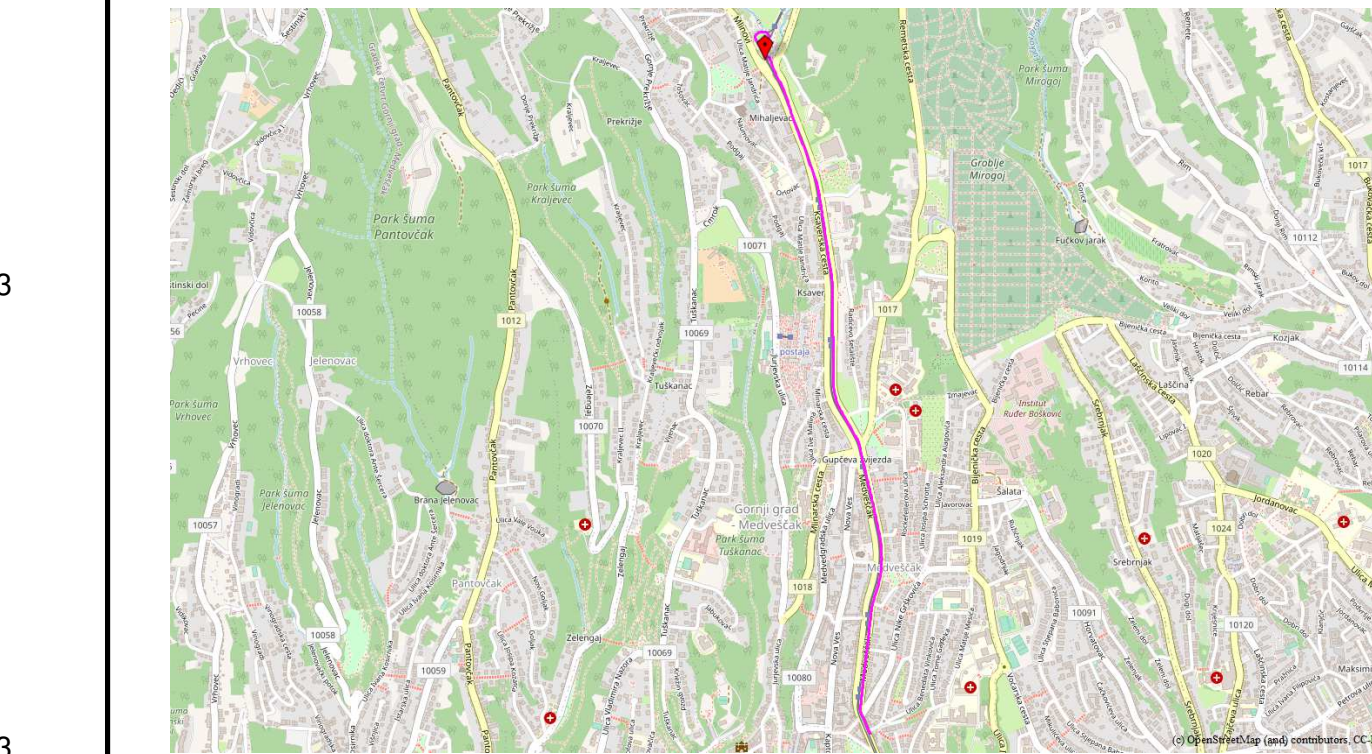
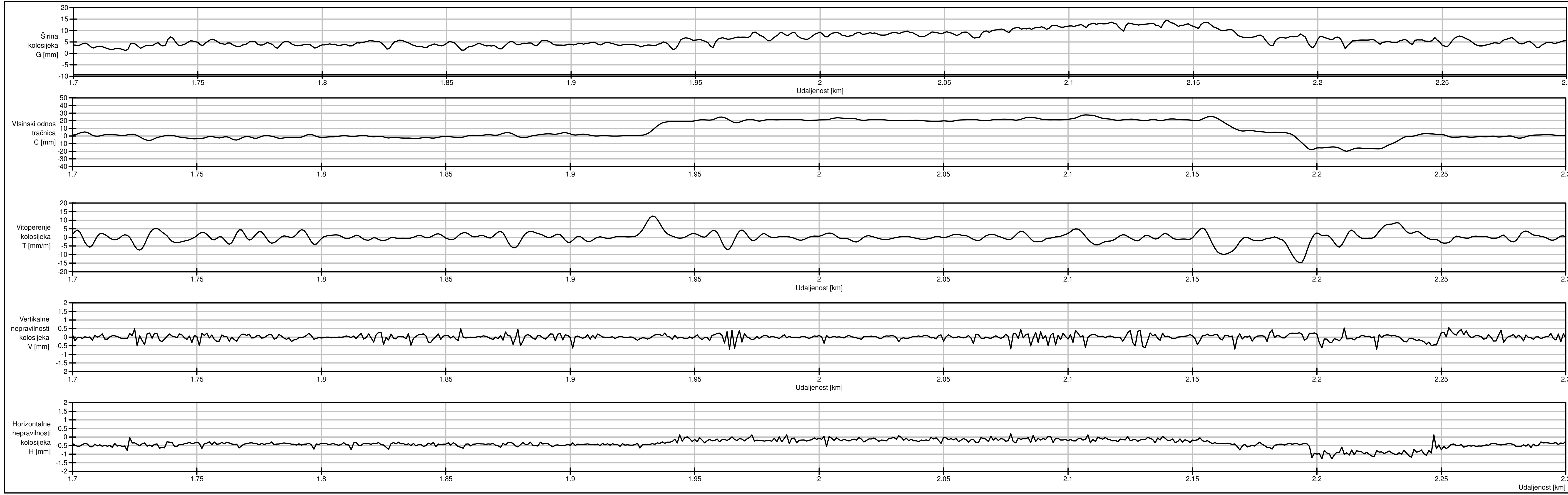
Diplomski rad: **Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu pametnim telefonima**

Kolegij: **Vibracije od prometa, 2023./24.**

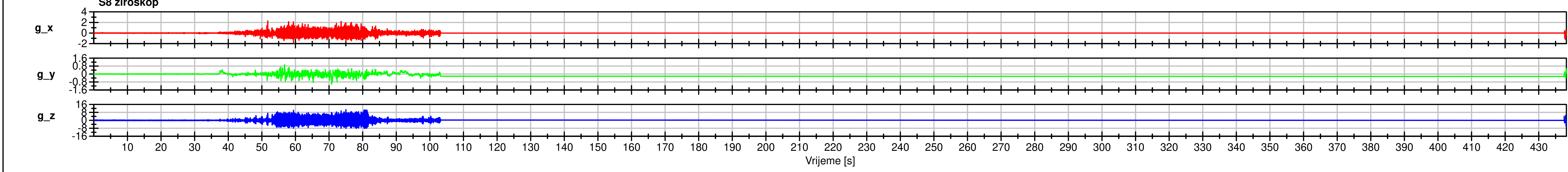
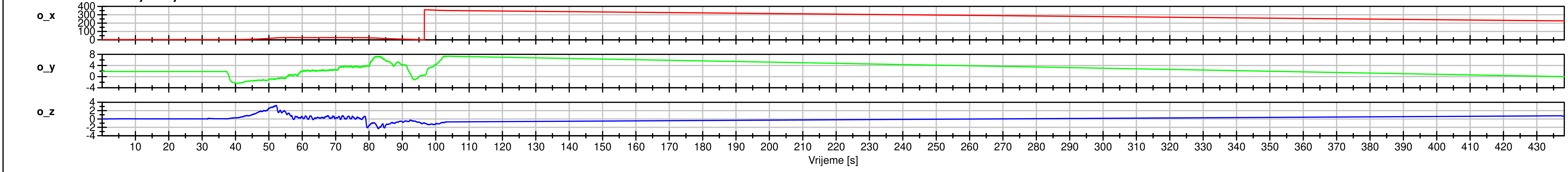
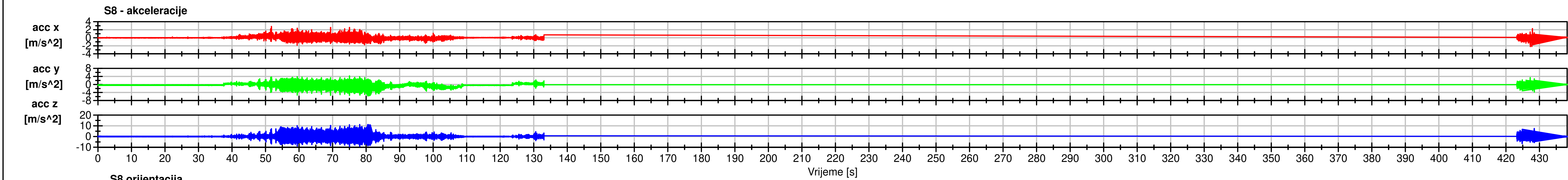
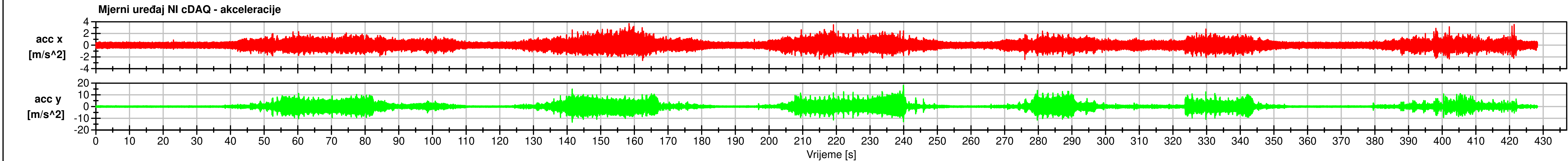
Izradila: **Petra Juričev-Grgin, 0083218198**

- [13] Dumitriu M., Miahil L., *Correlation between Ride Comfort Index and Sperling's Index for Evaluation Ride Comfort in Railway Vehicles*, Trans Tech Publications, Švicarska, 2018
- [14] Huang J., Kaewunruen S., *Passenger Comfort Evaluation with Machine Learning*
- [15] Azzoug A. i Kaewunruen S., *RideComfort: A Development of Crowdsourcing Smartphones in Measuring Train Ride Quality*, Transportation and Transit Systems, Frontiers in Built Environment, 2017.
- [16] Vinkó Á., *Comparative ride comfort analysis of in-service trams on extreme alignment configurations using smartphone-based sensing*, CETRA 2020 : 6th International Conference n Road and Rail Infrastructure, Zagreb, 2021
- [17] Vinkó Á. i sur., *Feasibility of Onboard Smartphones for Railway Track Geometry Estimation: Sensing Capabilities and Characterization*, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 67(1), pp. 200–210, 2023.
- [18] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, *Studija razvoja tramvajskog prometa Grada Zagreba Elaborat IV - Analiza tramvajskog sustava Grada Zagreba*, Zagrebački električni tramvaj d.o.o., Zagreb, 2020.
- [19] Majstorović I. i sur., *Influence of the Analytical Segment Length on the Tram Track Quality Assessment*

# PRILOZI



| <b>GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠNI U ZAGREBU-DIPLOMSKI RAD</b>  |                       |   |                                 |
|--|-----------------------|---|---------------------------------|
| Studij:  | DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI | Tema diplomskog rada:   |                                 |
| Smjer:   | PROMETNICE            | <b>Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu putem pametnih telefona</b> |                                 |
| Kolegij:   | VIBRACIJE OD PROMETA  |   |                                 |
| Ak. god.:  | 2023./2024.           | Nadzorni nastavnik:   | Izv.prof.dr.sc. IVO HALADIN     |
| Naziv priloga:   |                       | Diplomantica:   | PETRA JURICEV-GRGIN, 0083218198 |
| <b>Grafički prikaz parametara geometrije kolosijeka mjernim uređajem TET 1000 na dionici 2: Mihaļjevac-Grškovićeva, (poddionica Gupčeva zvijezda - Belostenčeva)</b> |                       |   |                                 |
| Datum izrade:  | 10. studenoga 2023.   | Datum obrane:   | 24. studenoga 2023.             |
| Mjerilo:   | 1:x                   | Broj priloga:   | 1                               |



| GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU-DIPLOMSKI RAD |                             |   |  |
|--|-----------------------------|---|--|
| Studij:  | DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI       | Tema diplomskog rada:   | Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na temelju mjerenja u tramvajskom vozilu putem pametnih telefona |
| Smjer:   | PROMETNICE                  |   |  |
| Kolegij:   | VIBRACIJE OD PROMETA        |   |  |
| Ak. god.:  | 2023./2024.                 | Diplomantica:   | PETRA JURICEV-GRGIN, 0083218198  |
| Nadzorni nastavnik:                                      | Izv.prof.dr.sc. IVO HALADIN | Naziv priloga: Grafički prikaz podataka zabilježenih unutar tramvajskog vozila na poddionici Gračansko Dolje-Mihaljevac |  |
| Datum izrade:  | Datum obrane:               | Mjerilo:  | Broj priloga:  |
| 10. studenoga 2023.                                      | 23. studenoga 2023.         | 1:x   | 2  |