

Primljen / Received: 30.7.2019.

Ispravljen / Corrected: 20.9.2019.

Prihvaćen / Accepted: 23.9.2019.

Dostupno online / Available online: 10.10.2019.

# Pregled i analiza metoda za ocjenu udobnosti vožnje na tramvajskim kolosijecima

## Autori:



Doc.dr.sc. **Ivo Haladin**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za prometnice  
[ihaladin@grad.hr](mailto:ihaladin@grad.hr)



Prof.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za prometnice  
[laki@grad.hr](mailto:laki@grad.hr)



Mr.sc. **Marijan Bogut**, dipl.ing.el.  
Končar – Institut za elektrotehniku d.d.  
[bogut@koncar-institut.hr](mailto:bogut@koncar-institut.hr)

Pregledni rad

**Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Marijan Bogut**

## Pregled i analiza metoda za ocjenu udobnosti vožnje na tramvajskim kolosijecima

U radu je dan pregled metoda za ocjenjivanje udobnosti vožnje na tramvajskim kolosijecima. Tramvajski se sustavi u brojnim segmentima razlikuju od standardnih željezničkih sustava, pa se stoga standardi razvijeni za standardne željeznice trebaju analizirati i evaluirati. Opisuje se metode ekvivalentne razine vibracija, Sperlingovog indeksa udobnosti vožnje te niz metoda predloženih normom EN 12299. Metode se uspoređuju na dvije probne tramvajske dionice ukupne dužine 21 km. Predložene su i preporuke za mjerenje udobnosti vožnje na tramvajskim kolosijecima.

### Ključne riječi:

tramvajski kolosijek, vibracije, tramvaj, Sperlingov indeks, udobnost vožnje, EN 12299, ISO 2631

Subject review

**Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Marijan Bogut**

## Overview and analysis of methods for assessing ride comfort on tram tracks

An overview of methods for evaluating comfort on tram tracks is given in this paper. Tramway systems differ in many aspects from standard railway tracks and, therefore, standards developed for standard rail lines have to be analysed and evaluated. Equivalent level of vibrations, Sperling ride index, and several methods proposed in EN 12299 are described, and these methods are compared on two trial tram sections 21 km in total length. Conclusions and recommendations for measuring ride comfort on tram tracks are presented.

### Key words:

tram tracks, vibration, tramway, Sperling index, ride comfort, EN 12299, ISO 2631

Übersichtsarbeit

**Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Marijan Bogut**

## Überblick über und Analyse von Methoden zur Bewertung des Fahrkomforts auf Straßenbahnschienen

Diese Arbeit bietet einen Überblick über Methoden zur Bewertung des Fahrkomforts auf Straßenbahnschienen. Straßenbahnsysteme unterscheiden sich in vielen Segmenten von Standardbahnsystemen, weshalb Normen, die für Standardschienen entwickelt wurden, analysiert und bewertet werden müssen. Die äquivalenten Vibrationswerte, der Sperling-Fahrindex und verschiedene in EN 12299 vorgeschlagene Methoden werden beschrieben und mit zwei Testabschnitten der Straßenbahn mit einer Gesamtlänge von 21 km und 19 Unterabschnitten verglichen. Es werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur Messung des Straßenbahnfahrkomforts sowie Schritte zur weiteren Verbesserung der Analysemethoden für Straßenbahnsysteme gegeben.

### Schlüsselwörter:

tramway lines, Vibration, Straßenbahn, Sperling-Index, Fahrkomfort, EN 12299, ISO 2631

## 1. Uvod

Tramvajski sustavi i sustavi lake željeznice okosnica su modernih gradskih prometnih mreža u mnogim europskim gradovima. Svakoga se dana bilježe milijuni tramvajskih putovanja, a svaki putnik koji ulazi u tramvajsko vozilo izložen je određenoj razini vibracija i buke, temperaturnim promjenama itd. U usporedbi s drugim oblicima prometa, uočava se potreba za praćenjem i poboljšanjem kvalitete vožnje u tramvajskim vozilima kako bi se privukao veći broj putnika te održala razina usluge. Kakvoća vožnje u kombinaciji s drugim faktorima kao što su vrijeme putovanja, prometne gužve i cijena, može bitno utjecati na izbor prijevoznog sredstva. Istraživanje kakvoće vožnje vrlo je složeno područje jer s jedne strane uključuje objektivnu komponentu - trenutačnu razinu izloženosti vibracijama, te subjektivnu komponentu putnika - njihovu osjetljivost na određenu razinu vibracija.

Infrastruktura lakih tračničkih sustava kao što je tramvaj odlikuje se specifičnim modalitetom vožnje koji se razlikuje od pružnog prometovanja standardnih željezničkih vozila, jer se vozna površina često dijeli s površinom koju koriste cestovna vozila. Vožnja tramvajem može biti udobna kada se radi o urbanoj vezi otvorenog kolosijeka ali, isto tako, to može biti i manje pogodna vožnja s čestim zaustavljanjima i ponovnim kretanjima u zajedničkom prometu s cestovnim vozilima te u uvjetima s čestim oštrim zavojima. Kako bi svojim putnicima osigurali najudobnije moguće uvjete tramvajskog prijevoza, upravitelji tramvajskih sustava moraju procijeniti i istražiti razine udobnosti putovanja na svojoj mreži.

Kolosiječna konstrukcija tramvaja i lake željeznice često se bitno razlikuje od konstrukcije standardnih željezničkih kolosijeka sa zastornom prizmom, što se očituje kroz: primjenu žljebastih tračnica, korištenje kontinuiranih armiranobetonskih ploča kao podloge, ugradnju kolosijeka u tijelo cestovne prometnice, primjenu kontinuirano poduprtog kolosijeka, korištenje plitkih žljebova na skretnicama i križištima itd. Te bitne razlike u odnosu na tradicionalne kolosijeke sa zastornom prizmom umanjuju mogućnost djelotvornog korištenja standardne mjerne opreme ili standardnih načina održavanja. Veličina mreže u mnogim slučajevima ne opravdava nabavu skupih mjernih vozila za praćenje stanja infrastrukture. U takvim situacijama uspostavljanje jednostavnih procedura mjerenja koje se predlaže u ovom radu može pružiti korisne podatke o udobnosti vožnje na bazi stanja kolosiječne konstrukcije.

Metode i norme koje se u ovom radu primjenjuju za analizu vibracija često služe za vozila koja prometuju po standardnim željezničkim kolosijecima, a takve se mreže od prosječnih tramvajskih mreža razlikuju po konstrukciji, brzini prometovanja i duljini putovanja. Zbog tih karakteristika, tramvajska vozila zahtijevaju i specifičnu analizu vibracija, posebice u pogledu parametra udobnosti vožnje. U karakteristike tramvajskog putovanja ubrajaju se relativno

kratke udaljenosti između stanica, niža brzina, složena zakrivljenost kolosijeka koji često prati trasu cestovnih prometnica, preplitanje trasa cestovnog i tračničkog prometa te drugačiji razlozi i uvjeti putovanja.

U ovom se radu daje uvid u tri različite metode za procjenu udobnosti vožnje duž tramvajске mreže te se razmatra njihova primjenjivost, praktičnost i preciznost u primjeni na tramvajskim sustavima. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu uključen je u postupak procjenjivanja kolosijeka na razini mreže u hrvatskim gradovima Osijeku (30 km kolosijeka u 2016. godini) [1] i Zagrebu (120 km kolosijeka u 2018/2019. godini) [2], pri čemu se razmatraju različiti parametri tramvajске infrastrukture kako bi se izradila složena ocjena svakog segmenta kolosijeka duž čitave tramvajске mreže. Značajni parametri za tu ocjenu su metode za određivanje mirnoće hoda i udobnosti vožnje na osnovi vibracija okretnog postolja i sanduka vozila pomoću konvencionalnog tramvajskog vozila koje je opremljeno odgovarajućim mjernim uređajima. U ovom se radu koriste iskustva stečena u tim analizama te se razmatraju dodatni pristupi za ocjenjivanje udobnosti vožnje.

Podaci o vibracijama dobiveni pomoću tramvajskih vozila opremljenih mjernim uređajima mogu se koristiti i tumačiti na brojne načine, od kojih se neki navode ovdje:

- ocjena mirnoće hoda (ocjena ponašanja vozila i procjena ponašanja infrastrukture) [3],
- otkrivanje nedostataka na kolosijeku (zavari, naboranost tračnica, puknuće tračnica, geometrija kolosijeka) [4],
- otkrivanje nedostataka na vozilima [5],
- otkrivanje nedostataka na kontaktnoj mreži [6],
- ocjena razine udobnosti u vozilu [7].

Ocjena mirnoće hoda predmet je brojnih istraživačkih radova, naročito onih koji se bave prometovanjem po standardnom željezničkom kolosijeku. Pritom se naglasak stavlja na interakciju kotača i tračnice te na stanje kolosijeka jer ti elementi bitno utječu na ponašanje vozila u pokretu. Mirnoća hoda može se definirati kao sposobnost vozila da ispunjava zahtjeve prevoženja u smislu razine izloženosti vibracijama, a ovisno o vrsti vozila, broju putovanja, robi koja se prevozi i osoblju koje upravlja tračničkim vozilom. Što se tiče udobnosti vožnje, u samoj procjeni u obzir se treba uzeti djelovanje mehaničkih vibracija na ljudsko tijelo [3]. Obično se mjeri ubrzanje okretnog postolja i karoserije vozila na koje djeluju nepravilnosti kotača i kolosijeka, te brzina kotrljanja i bočni trzaji, čime se mogu ocijeniti različiti elementi geometrije kolosijeka kao što su prijelazne krivine i nadvišenja.

Udobnost putnika drugačiji je aspekt analize vibracije zato što se u ovom segmentu tumači odziv ljudi na vibracije. Percepcija ljudi o vibracijama ovisna je o mnogim faktorima koji se mogu podijeliti na fizičke (amplituda, trajanje, raspon frekvencija) i psihološke (vrsta populacije, spol, starost, razina očekivanja, razina osjetljivosti) [8].

Istraživanja su pokazala da dugotrajno izlaganje visokofrekvencijskim vibracijama malih amplituda može uzrokovati probleme s koncentracijom, te da kratkotrajno izlaganje vibracijama niske frekvencije a visokih amplituda može prouzročiti oštećenja mišića i unutarnjih organa [9]. Osnovni svjetski standard koji se primjenjuje za ocjenu odziva ljudi na vibracije jest skup normi ISO 2631 [10]. Skup normi dopunjen je recentnom normom ISO 2631-4 procjenu utjecaja vibracija i rotacijskih gibanja na udobnost putnika i posade u transportnim sustavima s fiksnim vođenjem [11]. Percepcija vibracija u rasponu frekvencija od 1 do 10 Hz proporcionalna je ubrzanju, a za frekvencijski raspon od 10 do 100 Hz percepcija je proporcionalna brzini oscilacija. Granica percepcije vibracije prikazana kao ubrzanje iznosi  $0,001 \text{ m/s}^2$ , a doseže do  $0,1 \text{ mm/s}^2$  pri frekvenciji od 100 Hz. Ako vibracije izrazimo kroz brzinu, granica percepcije varira od  $0,1$  do  $0,3 \text{ mm/s}$  za raspon frekvencija od 1 do 100 Hz [12]. Ako vibracije izrazimo kroz pomak, ljudsko tijelo može osjetiti vibracije amplitude od  $0,001 \text{ mm}$ , a ljudski prsti mogu biti čak i do 50 puta osjetljiviji. Čovjeka mogu smetati oscilacije amplitude od  $0,2 \text{ mm}$  pri 5 Hz iako one ne mogu oštetiti konstrukciju [13]. Kako je odziv ljudi na vibracije izrazio subjektivan i varira od čovjeka do čovjeka, uobičajeno je da se pitanje utjecaja vibracija na ljude iskazuje kroz statističke parametre kao što je postotak osoba koje su na određeni način doživjele vibracije.

Udobnost vožnje i kvaliteta vožnje u željezničkim vozilima predmet su istraživanja u različitim državama, a tom se temom bave i mnoge željezničke uprave. To je složeno područje interakcije kolosijeka i vozila, odziva vozila i, što je zapravo najznačajnije, odziva ljudi na razinu vibracija kojima su izloženi tijekom putovanja željeznicom. Istraživanje ovog pitanja vrlo je složeno zbog načina na koji ljudi doživljavaju vibracije te zbog subjektivnog tumačenja pojma udobnosti. Na taj pojam ne utječe samo određena razina vibracija već i dužina putovanja, vrsta putovanja (svakodnevna putovanja, poslovna putovanja, turistička putovanja itd.). U analizi konkretnog slučaja, vibracije standardnih željezničkih vozila ocijenjene su na tri vrste standardnih putničkih vlakova u Švedskoj: međugradski vlakovi (IC), regionalni vlakovi X50 i vlakovi na kat X40 s istovremenim mjerenjem vibracija i anketiranjem putnika koji su se koristili prijenosnim računalima. Vibracije su izmjerene pomoći Sperlingovog indeksa i prema normi ISO 2631 [14]. Istraživanje je pokazalo da – iako su razine vibracija izmjerene Sperlingovom metodom i pomoću norme ISO upućivale na ugodnu vožnju – putnici su ipak imali određenih poteškoća s obavljanjem sjedećih aktivnosti kao što su tipkanje na prijenosnom računalu.

Različite su studije pokazale da se indeks mirnoće hoda, određen na temelju izravnih mjerenja geometrije kolosijeka, ne može izravno povezivati sa Sperlingovim indeksom mirnoće hoda [15]. Istraživanja provedena na tramvajskoj mreži u Hrvatskoj uključuju studiju [16] s proračunom Sperlingovog indeksa kvalitete vožnje duž Zvonimirove ulice u Zagrebu, gdje je procijenjena mirnoća hoda i udobnost vožnje na tri različite poddionice tramvajske pruge u Zvonimirovoj ulici, pri različitim brzinama vožnje. U okviru detaljne procjene ukupne

tramvajske mreže u gradu Osijeku, koju je 2016. godine proveo Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu [1], posebna je pozornost usmjerena na udobnost vožnje i mirnoću hoda, pri čemu su mjerenja provedena iz tramvaja u redovnom prometu pri prosječnoj brzini od  $30 \text{ km/h}$ . U tom je ispitivanju za procjenu kakvoće vožnje i udobnosti vožnje na dotičnim poddionicama primjenjena metoda ekvivalentne razine vibracija. Isti istraživački tim proveo je slično ispitivanje u gradu Zagrebu 2018/2019. godine [2] gdje je dodatno korišten i Sperlingov indeks na ukupnoj dužini tramvajske pruge od  $120 \text{ km}$ , pri čemu je korišteno redovno tramvajsko vozilo koje je prometovalo brzinom od  $20 \text{ km/h}$ .

## 2. Metode za analizu udobnosti vožnje

U ovom se radu primjenjuju tri metode za ocjenu udobnosti vožnje na bazi podataka o vibracijama prikupljenih s redovnog tramvajskog vozila koje je prometovalo po tramvajskoj pruzi. Spomenute metode su:

- Ekvivalentna razina vibracija ( $L_{\text{aeq}}$ )
- Sperlingov indeks vožnje  $W_z$
- norma EN 12299 (bazirana na normi ISO 2631)

Za sve te metode korišteni su u ovom istraživanju jednaki podaci prikupljeni pri prometovanju konvencionalnih tramvajskih vozila na tramvajskim mrežama u Osijeku i Zagrebu. Dodatne informacije o tim ispitnim dionicama navode se u točki 3.1.

U nastavku se objašnjava značenje nekoliko ključnih pojmova koji se u ovom radu koriste u skladu s normom HRN ISO 5805:2016 Mehaničke vibracije i udari – izloženost ljudi – Terminološki rječnik [17]:

**Vožnja:** okolina mjerljivog gibanja (uključujući vibracijske udare, translacijska i rotacijska ubrzanja) koje osjećaju osobe u ili na vozilu.

**Mirnoća hoda:** razina na kojoj cjelokupno subjektivno iskustvo (uključujući i okolinu gibanja i pripadajuće faktore) putovanja ili svih putovanja vozilom doživljavaju putnici ili vozači te to iskustvo ocjenjuju povoljnim ili nepovoljnim.

**Udobnost:** subjektivno stanje ugone ili odsutnost mehaničkih smetnji u specifičnoj okolini (gledajući mehaničkih vibracija ili repetitivnih udara).

Prema normi EN 12299 [18], udobnost se definira kako slijedi:

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

Jedna od ranih ali još uvijek primjenljivih metoda za ocjenu mirnoće hoda i udobnosti vožnje, bazirana na metodi indeksa vožnje, jest Sperlingov indeks vožnje  $W_z$ . Nakon razvoja norme za ocjenu vibracija čitavog tijela (ISO 2631), posebna se pozornost usmjerava prema tome kako sustavi koji se kreću po fiksnoj trasi utječu na vibracije čitavog tijela [11]. Najnoviju normu o udobnosti putnika, EN 12299, uveo je Europski odbor za normizaciju CEN/TC256/WG7, a ista je 2009. godine prihvaćena i kao europska norma [18].

### 2.1. Ekvivalentna razina vibracija ( $L_{aeq}$ )

Metoda određivanja ekvivalentnih razina vibracija na segmentima kolosijeka utemeljena je stručnim i znanstvenim radom Katedre za željeznice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Metoda je primijenjena za analizu vožnje različitih tramvajskih vozila preko određenog segmenta kolosijeka [19, 20] i za usporedbu vibracija tramvajskog vozila tijekom vožnje različitim dionicama kolosijeka na mreži tramvajskih pruga [1]. Određivanjem ekvivalentnih razina vibracija omogućeno je jednostavno vrednovanje različitih događaja u snimljenim vremenskim zapisima signala ubrzanja. Akcelerometrom ugrađenim u tramvajsko vozilo na različitim pozicijama u vertikalnom i poprečnom smjeru može se određivati mirnoća hoda (akcelerometar na postolju vozila) i udobnosti vožnje (akcelerometar u putničkom prostoru).

Analiziraju se snimljeni signali ubrzanja u vertikalnom i poprečnom smjeru, u frekvencijskom opsegu od 2 Hz do 200 Hz i određuju se razine ubrzanja u vremenskim intervalima od jedne sekunde prema izrazu (1):

$$L_a = 20 \cdot \log_{10} \left[ \frac{a}{a_0} \right] \tag{1}$$

gdje je  $L_a$  razina ubrzanja (dB),  $a$  je efektivna vrijednost ubrzanja ( $m/s^2$ ),  $a_0$  je referentna razina ubrzanja  $10^{-6} m/s^2$ . Ekvivalentna razina ubrzanja određuje se za pojedine segmente tramvajskog kolosijeka i za vremenske periode od 30 sekundi tako da se određuje energijska srednja razina prema izrazu (2):

$$L_{aeq} = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{1}{N} \left( 10^{\frac{L_{a1}}{10}} + 10^{\frac{L_{a2}}{10}} + 10^{\frac{L_{a3}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{aN}}{10}} \right) \right] \tag{2}$$

gdje je  $L_{aeq}$  ekvivalentna razina ubrzanja za odabrani segment kolosijeka (dB),  $N$  je broj jednosekundnih razina na segmentu kolosijeka (uglavnom intervali konstantne brzine vožnje u trajanju 30 s),  $L_{a1} - L_{aN}$  su jednosekundne razine na segmentu kolosijeka.

Na temelju srednje vrijednosti ekvivalentnih razina ubrzanja za sve snimljene signale vibracija određuju se indeksi mirnoće hoda  $I_q$  i indeksi udobnosti vožnje  $I_c$  za pojedini segment kolosijeka. Radi ocjene cjelokupne mreže tramvajskih pruga, svi promatrani segmenti kolosijeka se rangiraju na ljestvici od 0 do 1 (za segment mreže s najmanjim vibracijama ti indeksi iznose 0, a vrijednost 1 odnosi se na segment mreže s najvećim vibracijama).

### 2.2. Indeks Wz – Sperlingova metoda

Sperlingov indeks Wz (njem. Wertzungzahl method [21]) koristi se za ocjenu mirnoće hoda i udobnosti vožnje željezničkih vozila. Kod ocjenjivanja mirnoće hoda ocjenjuje se stanje samog vozila. Udobnost vožnje podrazumijeva ocjenu vozila u skladu s učinkom mehaničkih vibracija na putnike. Kod primjene na vozilo

koje prometuje konstantnom brzinom moguće je usporediti mirnoću hoda i udobnost vožnje na različitim dionicama kolosijeka [15, 16]. Prednost primjene Sperlingove metode su vrijednosti indeksa Wz u obliku jednostavnih brojeva s preciznim značenjem i objašnjenjem. Indeks Wz se određuje na temelju vibracija vozila, daje informaciju o dinamičkom ponašanju vozila i omogućava identifikaciju određenih rješenja za poboljšanje mirnoće hoda i udobnosti vožnje [3].

Sperlingova metoda u praksi je često primjenjivana na standardnim željezničkim kolosijecima [3, 22, 23], ali i na mrežama tramvajskog kolosijeka [15, 16].

Definirane su jasne granične vrijednosti Sperlingovog indeksa za ocjenu mirnoće hoda (tablica 1.) i udobnosti vožnje (tablica 2.), koje su određene na temelju ispitivanja vibracija s putnicima i dopunjene rezultatima ostalih ispitivanja [21].

Tablica 1. Granične vrijednosti Sperlingovog indeksa mirnoće hoda

Indeks Wz	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

Indeks Wz	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

Sperlingovom metodom analiziraju se ubrzanja u frekvencijskom području do 30 Hz. Metoda analize je jednostavna i omogućava kontinuirani prikaz indeksa Wz uzduž kolosijeka i pregled nepravilnosti na kolosijeku. Indeks Wz određuje se frekvencijskim vrednovanjem amplituda ubrzanja na temelju sljedećih izraza:

$$Wz = \sqrt[10]{a^3 \cdot B^3} \text{ (mirnoća hoda)} \tag{3}$$

$$Wz = \sqrt[6.67]{a^2 \cdot B^2} \text{ (udobnost vožnje)} \tag{4}$$

pri čemu  $B$  predstavlja težinski faktor koji se za određivanje indeksa mirnoće hoda računa prema izrazu (5):

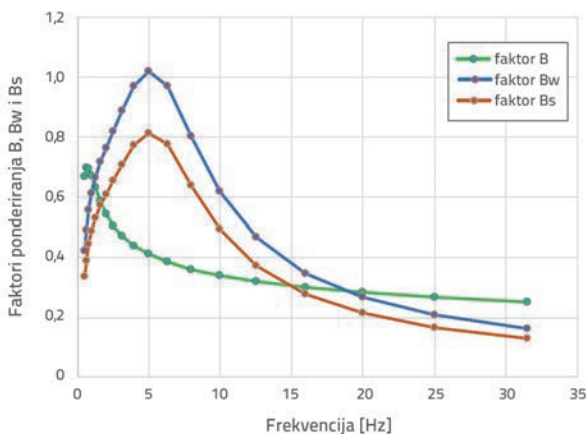
$$B(f) = 1.14 \cdot \sqrt{\frac{\left[ (1 - 0.056f^2)^2 + (0.645f)^2 \cdot (3.55f^2) \right]}{\left[ (1 - 0.252f^2)^2 + (1.547f - 0.00444f^3)^2 \right] \cdot (1 + 3.55f^2)}} \quad (5)$$

Težinski faktor  $B$  za određivanje indeksa udobnosti vožnje računa se prema izrazu (6):

$$B(f) = k \cdot \sqrt{\frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2}} \quad (6)$$

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

Krivulje težinskih faktora za frekencijsko vrednovanje vršnih vrijednosti vibracija  $a_{\text{peak}}$  [cm/s<sup>2</sup>] prikazane su na slici 1. za pojase 1/3 oktave u frekencijskom opsegu od 0,5 Hz do 30 Hz.



Slika 1. Težinski faktori za određivanje indeksa mirnoće hoda ( $B$ ) i indeksa udobnosti vožnje ( $B_w$ ,  $B_s$ )

Prema [3], gdje je razvijen numerički model i simuliran Sperlingov indeks  $W_z$  uzduž sanduka vozila, indeks  $W_z$  je manji u središtu sanduka i veći od dva vozna postolja prema krajevima sanduka. Zbog toga je važno odabrati odgovarajuće lokacije akcelerometara za određivanje indeksa mirnoće hoda.

### 2.3. EN 12299 – ocjena udobnosti vožnje

Europski odbor za normizaciju (CEN) CEN/TC256/WG7 bavi se udobnošću putnika tijekom vožnje. Europska prednorma ENV 12299 objavljena je 1999. godine. Norma za mjerenje i ocjenjivanje udobnosti vožnje revidirana je i konačno prihvaćena kao europska norma 2009. godine [18, 24]. Dvije se metode predlažu kao osnova za određivanje udobnosti vožnje:

- posredno mjerenje: mjerenje okoline gibanja različitim pokazateljima količine gibanja, kao što su ubrzanje ili brzina kotrljanja
- izravno mjerenje: mjerenje stvarne reakcije putnika, na

primjer traženjem putnika da ispune anketni upitnik.

Iako postoje neke upute za izravna mjerenja, u spomenutoj se normi uglavnom opisuju metode koje se temelje na posrednim mjerenjima podataka o ubrzanju vozila. Gibanje vozila uglavnom se mjeri akcelerometrima i giroskopima koji se postavljaju na odgovarajuća mjesta na karoseriji vozila. Izravna ispitivanja bazirana na anketnim upitnicima nisu definirana u normi EN 12299 [4], iako su određene upute dane u informativnom dodatku.

Metoda ocjenjivanja bazirana na RMS-u, definirana u normi ISO 2631-1 *Ocjena izlaganja ljudi vibracijama čitavog tijela* [10], te proširena radi obuhvaćanja prisilno vođenih sustava u normi ISO 2631-4 [25], u biti je osnovna metoda (ekvivalentna metodi kontinuirane udobnosti) za kasnije statističke metode razvijene u normi EN 12299. Tijekom vožnje vlakom, osobe koje se u njemu nalaze mogu osjetiti velike fluktuacije u razinama ubrzanja i frekvencije. Norma ISO 2631-1 pogodna je za ocjenjivanje okoline gibanja s malima varijacijama u razinama, dok se statistička metoda uvedena u normi EN 12299 bavi fluktuacijama i varijacijama koje se odnose na putnike. Statistička metoda također izbjegava osjetljivost na artefaktične ekstreme. Dakle, u usporedbi s normom ISO 2631, norma EN 12299 smatra se preciznijom, pa je stoga usvojena u većini zemalja za ocjenjivanje razine udobnosti vožnje [6, 15]. Sljedeće metode definirane u normi EN 12299 namijenjene su za ocjenjivanje udobnosti vožnje:

- kontinuirana udobnost  $C_{Cx}$ ,  $C_{Cy}$  i  $C_{Cz}$
- standardna metoda srednje udobnosti  $N_{MV}$
- cjelovite metode srednje udobnosti  $N_{VA}$  i  $N_{VD}$
- udobnost 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 [10]), samo što su pojasno niskopropusni filter  $W_p$  (koji se koristi u metodama  $P_{CT}$  i  $P_{DE}$ ) i krivulja za ponderiranje  $W_b$  za vertikalni smjer posebno projektirani za primjenu na željeznicama [18]. Osim toga, za svaku od tih metoda definirana je i naknadna obrada u obliku proračuna pomoću kliznih prozora, proračuna RMS, uprosječivanja, statističkih analiza itd.

Za različite postupke mjerenja potrebni su različiti položaji akcelerometara te različiti scenariji mjerenja. Popis mjernih položaja daje se u radu [18], tablica 3.

U normi se također predlažu i različite druge moguće primjene izmjerenih podataka, tj. primjene koje se ne odnose na procjenu udobnosti vožnje, tablica 4. To je iznimno vrijedna informacija jer je osnovna svrha ovog rada ocijeniti različite segmente



Tablica 3. Mjerene veličine i mjerni položaji prema [18]

Indeks udobnosti	Standardna metoda srednje udobnosti	Cjelovita metoda srednje udobnosti		Kontinuirana udobnost	Udobnost na prijelaznim zavojima	Udobnost na diskretnim događajima
	$N_{MV}$	$N_{VA}$	$N_{VD}$	$C_{Cx}/C_{Cy}/C_{Cz}$	$P_{CT}$	$P_{DE}$
Mjerene veličine	Ubrzanja u tri smjera	Ubrzanja u tri smjera		Ubrzanja u tri smjera	Bočno ubrzanje, bočni trzaj, brzina kotrljanja	Bočno ubrzanje
Mjerni položaj	Pod	Pod	Pod i sučelja	Pod	Pod	Pod

Tablica 4. Upute za korištenje različitih metoda za alternativne namjene [18]

	Standardna metoda srednje udobnosti	Cjelovita metoda srednje udobnosti	Kontinuirana udobnost	Udobnost na prijelaznim zavojima	Udobnost na diskretnim događajima
Indeks udobnosti	$N_{MV}$	$N_{VA}$ i $N_{VD}$	$C_{Cx}/C_{Cy}/C_{Cz}$	$P_{CT}$	$P_{DE}$
Geometrija kolosijeka				+	
Održavanje kolosijeka	+		+		+
Održavanje vozila	+		+		

kolosijeka i utjecaje stanja infrastrukture i održavanja na udobnost vožnje. Ova metoda, ako se koristi za različite vrste vozila, može se primijeniti i za ocjenjivanje utjecaja vozila na udobnost vožnje, što se također istražuje u okviru ovog rada. Stoga će se u nastavku rada koristiti metode "standardna metoda srednje udobnosti" i "kontinuirana udobnost".

**2.4. Metoda kontinuirane udobnosti ( $C_{Cx}$ ,  $C_{Cy}$ ,  $C_{Cz}$ ), ekvivalent normi EN ISO 2631**

Ova metoda, zajedno s ljestvicama za ocjenjivanje, ekvivalentna je metodi opisanom u normama EN ISO 2631-1 i EN ISO 2631-4, a uključuje novopredloženu krivulju za ponderiranje  $W_b$  koja se razlikuje od krivulje  $W_k$  korištene u starijim verzijama ove norme [26]. U normi [4] predlaže se da vrijeme za uprosječivanje amplitude vibracija iznosi 5 sekundi. 5-sekundne arms vrijednosti koriste se za ocjenu kontinuirane udobnosti. U toj se metodi razmatraju sve petosekundne vrijednosti  $a_{rms}$  koje su izračunane 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.

$$C_{Cx} = a_{POX}^{W_d}(t) \tag{7}$$

$$C_{Cy} = a_{POY}^{W_d}(t) \tag{8}$$

$$C_{Cz} = a_{POZ}^{W_d}(t) \tag{9}$$

Izmjerene vrijednosti kontinuirane udobnosti mogu se usporediti s ljestvicom prikazanom u tablici 5.

Pretpostavlja se da je ta metoda prikladna za ocjenjivanje udobnosti tijekom kraćih putovanja unutar tramvajske mreže. Petosekundni RMS ponderiran prema krivuljama za ponderiranje, te točne granice između pojedinačnih razina udobnosti, mogu poslužiti kao pomoć pri održavanju infrastrukture i u provedbi

popravaka duž kolosijeka, i to ne samo radi točnijeg određivanja lokacije (otprilike 50 – 70 m, ovisno o brzini tramvaja) nego i radi jasno određenih pragova za ocjenjivanje razine udobnosti.

Tablica 5. Ljestvica kontinuirane udobnosti za  $C_{Cy}$  i  $C_{Cz}$

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

**2.5. Standardna metoda srednje udobnosti  $N_{MV}$**

Ovom se metodom ocjenjuje udobnost u kontinuiranom vremenskom intervalu od pet minuta za putnika koji sjedi. Koriste se krivulje za ponderiranje  $W_b$  i  $W_d$  te se registriiraju vibracije u rasponu frekvencija od 0,4 Hz do 100 Hz. Metoda je pogodna za relativno ravne poteze jer zanemaruje kvazistatičko ubrzanje koje je javlja kada je kolosijek u krivini.

Ubrzanje se mjeri u uzdužnim (x), bočnim (y) i vertikalnim (z) smjerovima. Nakon ponderiranja frekvencija, za svaki se smjer određuje 60 kontinuiranih petosekundnih ponderiranih RMS ubrzanja. Na temelju vrijednosti 60 RMS, u nastavku obrade koristi se 95. percentil (četvrta najviša vrijednost). Ti percentili ponderiranih ubrzanja u tri smjera ( $a_{XP95}^{W_d}$ ,  $a_{YP95}^{W_d}$ ,  $a_{ZP95}^{W_d}$ ) kombiniraju se s korjenovanjem sume kvadrata prema sljedećoj jednadžbi, koja vrijedi za petominutno razdoblje:

$$N_{MV} = 6\sqrt{(a_{XP95}^{W_d})^2 + (a_{YP95}^{W_d})^2 + (a_{ZP95}^{W_d})^2} \tag{10}$$

Sljedeći se izrazi mogu koristiti za pojedinačno ocjenjivanje udobnosti vožnje u svakom smjeru:

$$N_{MVx} = 6 \cdot a_{XP95}^{W_d} \quad (11)$$

$$N_{Mvy} = 6 \cdot a_{YP95}^{W_d} \quad (12)$$

$$N_{MVz} = 6 \cdot a_{ZP95}^{W_d} \quad (13)$$

Rezultirajuća vrijednost  $N_{MV}$  može se tumačiti prema граниčnim vrijednostima za kontinuiranu udobnost definiranim u normi, tablica 6.

Tablica 6. Ljestivica indeksa  $N_{MV}$  za srednju udobnost vožnje, prema [4]

Uvjjet	Udobnost
$N_{MV} < 1,5$	Vrlo udobno
$1,5 < N_{MV} < 2,5$	udobno
$2,5 < N_{MV} < 3,5$	Srednje dobnno
$3,5 < N_{MV} < 4,5$	Neudobno
$N_{MV} > 4,5$	Vrlo neudobno

Metoda  $N_{MV}$  po mnogim je obilježjima slična tradicionalnoj analizi vibracija prema normi ISO 2631-1. Sporni dio je primjena 95. percentila gdje se koristi samo četvrta najviša vrijednost. Različite dionice mogu prividno biti jednako udobne, iako se kod njih razlikuju sve vrijednosti osim četvrtoga najvišeg petosekundnog intervala. Zbog takvog uprosječivanja, teško je na petominutnoj dionici locirati previsoke vrijednosti. Čini se da je za tramvajske mreže petominutni interval nepraktičan jer su dionice i udaljenosti u gradskim tračničkim sustavima mnogo manje od onih koje se koriste na standardnim željezničkim kolosijecima. Zakrivljenost također ima važnu ulogu u tramvajskom prometu, a ona se u ovoj metodi zanemaruje.

## 2.6. Cjelovite metode srednje udobnosti $N_{VA}$ i $N_{VD}$

U kompletnoj metodi srednje udobnosti ocjenjuje se kontinuirana petominutna udobnost, isto kao i kod standardne metode srednje udobnosti ( $N_{MV}$ ). Indeks udobnosti  $N_{VA}$  koristi se za putnike koji sjede, a isto tako se bazira na 95. percentilu. Vrijednost  $N_{VA}$  određuje se ne samo na temelju akcelerometara postavljanjenih na pod već i na temelju akcelerometara postavljanjenih na sjedalo (za bočne i vertikalne smjerove) i na naslon sjedala (za uzdužni smjer). Zbog toga se ova metoda teže može primijeniti u eksperimentima nego što je to slučaj kod prethodno opisane metode. Za izračunavanje udobnosti putnika koji sjedi, koristi se izraz (14):

$$N_{VA} = 4 \cdot \left( a_{ZP95}^{W_b} \right) + 2 \cdot \sqrt{\left( a_{YA95}^{W_d} \right)^2 + \left( a_{ZA95}^{W_b} \right)^2} + 4 \cdot \left( a_{XD95}^{W_c} \right) \quad (14)$$

gdje ZP, YA, ZA, XD označavaju različite položaje i smjerove akcelerometara na podu, sjedalu i naslonu sjedala prema [18]. Metoda  $N_{VD}$  koristi se za putnike koji stoje. Ubrzanja se mjere samo na podu. Indeks udobnosti  $N_{VD}$  temelji se na srednjim vrijednostima (50. percentil) izmjerenih ubrzanja u sva tri smjera,

te na 95. percentilu izmjerenih ubrzanja u bočnom smjeru. Obje metode imaju isti nedostatak kao i standardna metoda srednje udobnosti jer se odbacuje 55 od 60 petosekundnih vrijednosti RMS, a ne može se ni odrediti detaljna lokacija događaja duž trase.

$$N_{VD} = 3 \cdot \sqrt{\left( a_{XP50}^{W_d} \right)^2 + \left( a_{YP50}^{W_d} \right)^2 + \left( a_{ZP50}^{W_b} \right)^2} + 5 \cdot \left( a_{YP95}^{W_d} \right) \quad (15)$$

## 2.7. Udobnost na diskretnim događajima $P_{DE}$ i udobnost u prijelaznim krivinama $P_{CT}$

U normi se definiraju sljedeće dvije metode u okviru kojih se udobnost procjenjuje na temelju istraživanja provedenog u Britanskom odjelu za istraživanja u željezničkom prometu (eng. *British Rail Research – BRR*) [27]. U njima se kao dvije osnovne varijable neudobnosti koristi srednje bočno ubrzanje te vršno prema vršnom bočnom ubrzanju. Metodologija je usvojena i neznatno izmijenjena, ali je prije svega namijenjena istraživanju pruga za velike brzine. Stoga se te metode neće dodatno objašnjavati, jer u tramvajskom prometu nema izazova kao što su njihanje pri velikim brzinama i ponašanje u dugim prijelaznim krivinama.

## 3. Mjerenje udobnosti vožnje

U okviru ovog rada, udobnost vožnje duž tramvajske mreže istraživana je na dvije ispitne dionice. Te su dionice odabrane tako da budu obuhvaćeni različiti načini vožnje, različite konfiguracije trasa, različite vrste kolosijeka, različita rješenja za zatvaranje kolosijeka te različite vrste tramvajskih vozila.

### 3.1. Karakterizacija ispitnih dionica

Ispitne dionice smještene su unutar dviju tramvajskih mreža u Hrvatskoj, tj. one su dio tramvajske mreže grada Osijeka i tramvajske mreže grada Zagreba. Svaka od te dvije ispitne dionice dodatno je podijeljena u niz poddionica prema vrsti gornjeg ustroja, prema tipu zatvaranja kolosijeka te prema datumu posljednje rekonstrukcije.

#### 3.1.1. Ispitna dionica 1 - grad Osijek

Ispitna dionica 1 dio je tramvajske mreže grada Osijeka. Osijek ima 30 km uskotračne tramvajske pruge (1000 mm), a veći remont na elementima te infrastrukture provedeni su u vremenskom intervalu od prije 29 godine pa do najnovijeg zahvata koji je obavljen prije dvije godine [1]. 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 poluodvojenim 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



Slika 2. Različite vrste tramvajskih kolosijeka u Osijeku



Slika 3. Dionica br. 1 s poddionicama od D07 do D15

površinu tramvaji dijele s cestovnim vozilima, a prosječna brzina prometovanja iznosi 10 km/h (slika 2.).

Za potrebe ovog istraživanja udobnosti vožnje odabrana je reprezentativna dionica koja najbolje predstavlja cjelokupnu mrežu. Odabir je proveden 2016. godine na temelju opsežnih

istraživanja čitave osječke tramvajske mreže, tj. na bazi analize geometrije kolosijeka, buke, vibracija, udobnosti te vizualnog pregleda [1]. Ukupna dužina ispitne dionice iznosi 9,5 km a podijeljena je prema vrsti tramvajskih kolosijeka na poddionice kako je to prikazano na slici 3. i u tablici 7.

Tablica 7. Karakteristike poddionica duž probne dionice 1

Poddionica	Opisno ime dionice	Period eksploatacije [god]	Tip gornjeg ustroja	Dužina [m]
D07	Trg A. Starčevića – Rokova	2	B	553
D08	Rokova – Kanižlićeva	13	E	673
D09	Kanižlićeva – Svilajska	15	A	1960
D10	Svilajska – Višnjevac	12	E	324
D11	Strossmayerova 347 – križanje ulice Bana Jelačića / I.G. Kovačića	3	C+D	2452
D12	Višnjevac – Svilajska	19	E	334
D13	Svilajska – Kanižlićeva	15	A	1955
D14	Kanižlićeva – Rokova	16	E	660
D15	Rokova – Trg A. Starčevića	17	B	542
<b>Ukupna dužina dionice br. 1</b>				<b>9463</b>

Legenda tipova gornjeg ustroja:  
 A – nosivi sloj: AB ploča (25 cm); pričvrсни pribor: DEPP; zatvaranje: kameni agregat 16-31,5 mm. B – nosivi sloj: AB ploča (25 cm); pričvrсни pribor: ZG-2; zatvaranje: beton/asfalt. C – nosivi sloj: AB ploča (30 cm); pričvrсни pribor: DEPP; zatvaranje: betonski blokovi. D – nosivi sloj: AB ploča (30 cm); pričvrсни pribor: DEPP; zatvaranje: beton/asfaltni habajući sloj. E – nosivi sloj: drobljenac (25 cm); pričvrсни pribor: kolosiječni zastor 30-60 mm (20 cm); zatvaranje: kameni agregat 16-31,5 mm



Trasa pruge uglavnom je položena u pravcu ili leži u blagom zavoju  $R > 500$  m, osim na nekim segmentima kao što su  $R_{\min} = 19$  m na okretištu i  $R = 33$  m (D11) i  $R = 50$  m (D07 i D 15). Uzdužni pad je zanemariv, tj. iznosi samo 1 ‰.

### 3.1.2. Ispitna dionica 2 – grad Zagreb

Zagrebačna tramvajska mreža veća je i sastoji se od ukupno 116 km uskotračne operativne tramvajske pruge (što ne uključuje manevarske i servisne kolosijeka) a širina kolosijeka na svim dijelovima iznosi 1000 mm. Tramvajskom prugom obuhvaćeni su gotovo svi dijelovi zagrebačkog gradskog područja. Konfiguracija kolosijeka slična je onoj u Osijeku, s otvorenim dijelovima pruge sa zatvorenim tramvajskim koridorom gdje brzine dosežu 50 km/h, preko dionica kolosijeka obloženih betonskim blokovima u poluodvojenim koridorima (kojima se kreću samo tramvaji i servisna vozila), pa do dionica u centru grada velike zakrivljenosti trase, kolosijekom zatvorenim betonom i asfaltnim habajućim slojem ili AB blokovima, gdje prometnu površinu tramvaji dijele s cestovnim vozilima, a prosječna brzina prometovanja iznosi 10 km/h.

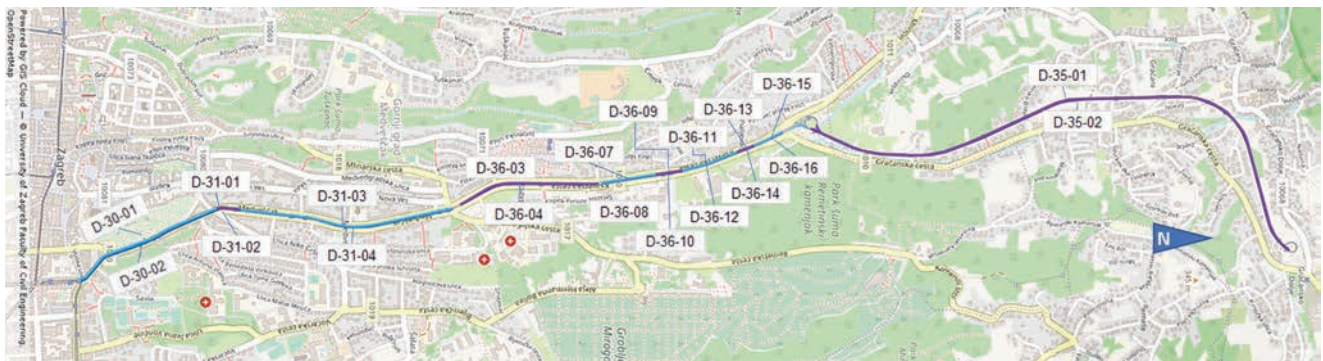
Odabrana ispitna dionica 2 po svojim karakteristikama vjerno predstavlja glavninu tramvajske mreže u Zagrebu, a odlikuje se različitim konfiguracijama kolosijeka i obloge te različitim vremenima korištenja poddionica. Dionica 2, ukupne dužine 11,5 km, prostire se od početka Ribnjaka (križanje s Vlaškom ulicom) pa do okretišta Dolje. Sastoji se od ukupno 20 poddionica. Na toj je dionici provedena opsežna analiza tramvajskog kolosijeka u okviru *Studije o razvoju tramvajskog prometa u Zagrebu* koju je izradio Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu za poduzeće ZET koje upravlja tramvajskom mrežom u gradu Zagrebu [2]. U analizi su korištene poddionice dužine od preko 50 m jer se većina parametara ne može točno odrediti na kraćim dionicama (npr. petosekundna kontinuirana udobnost). Situacijski plan analiziranih dionica prikazan je na slici 4. Prikaz dionice 2 s njenim poddionicama i općim podacima o konstrukciji svake poddionice daje se u tablici 8.

Trasa pruge uglavnom je položena u pravcu ili leži u blagom zavoju  $R > 500$  m, osim na nekim segmentima kao što su  $R_{\min} = 50$  m na D-30-01 i D-30-02. Uzdužni nagib pruge varira do najviše 20 ‰ na dionici od Ribnjaka do Mihaljevca te do najviše 60 ‰ na dionici Mihaljevac – Dolje (D-35-01 i D-35-02).

Tablica 8. Prikaz konstrukcije poddionica duž dionice 2

Poddionica	Opisni naziv dionice	Period eksploatacije [god]	Tip gornjeg ustroja	Dužina [m]
D-30-01	Šoštarićeva - Ribnjak (Grškovićeve - Vlaška)	22	A	679
D-30-02	Šoštarićeva - Ribnjak (Vlaška - Grškovićeve)	22	A	670
D-31-01	Medveščak (Grškovićeve - Ribnjak)	22	B	101
D-31-02	Medveščak (Ribnjak - Grškovićeve)	22	B	101
D-31-03	Medveščak (Gupčeva Zvijezda - Grškovićeve)	11	C	930
D-31-04	Medveščak (Grškovićeve - Gupčeva Zvijezda)	11	C	928
D-36-03	Ksaver (Jandrićeva - Gupčeva Zvijezda)	14	C	620
D-36-04	Ksaver (Gupčeva Zvijezda - Jandrićeva)	14	C	617
D-36-07	Ksaver (Jandrićeva sjever - Jandrićeva jug)	22	D	242
D-36-08	Ksaver (Jandrićeva jug - Jandrićeva sjever)	22	D	242
D-36-09	Ksaver (prijelaz Jandrićeva sjever, Mihaljevac - Gupčeva Zvijezda)	22	A	114
D-36-10	Ksaver (prijelaz Jandrićeva sjever, Gupčeva Zvijezda - Mihaljevac)	22	A	114
D-36-11	Ksaver (Ksaverska jug - Jandrićeva sjever)	22	D	250
D-36-12	Ksaver (Jandrićeva sjever - Ksaverska jug)	22	D	251
D-36-13	Ksaver (prijelaz Ksaverska jug, Mihaljevac - Gupčeva Zvijezda)	22	A	77
D-36-14	Ksaver (prijelaz Ksaverska jug, Gupčeva Zvijezda - Mihaljevac)	22	A	77
D-36-15	Ksaver (Ksaverska sjever - Ksaverska jug)	22	D	138
D-36-16	Ksaver (Ksaverska jug - Ksaverska sjever)	22	D	139
D-35-01	Mihaljevac - Dolje (Dolje - Mihaljevac)	1	E	2482
D-35-02	Mihaljevac - Dolje (Mihaljevac - Dolje)	1	E	2532
<b>Ukupna dužina dionice 2</b>				<b>11471</b>

Legenda tipova gornjeg ustroja:  
 A – nosivi sloj: AB ploča (25 cm); pričvrсни pribor: ZG-3/2; zatvaranje: AB ploče. B – nosivi sloj: AB ploča (25 cm); pričvrсни pribor: ZG-3/2; zatvaranje: kameni agregat 16-31,5 mm. C – nosivi sloj: AB ploča (25 cm); pričvrсни pribor: DEPP; zatvaranje: kameni agregat 16-31,5 mm. D – nosivi sloj: drobljenac (25 cm); pričvrсни pribor: kolosiječni zastor 30-60 mm (20 cm); zatvaranje: kameni agregat 16-31,5 mm. E – nosivi sloj: AB ploča (25 cm); pričvrсни pribor: PPE; zatvaranje: kameni agregat 16-31,5 mm



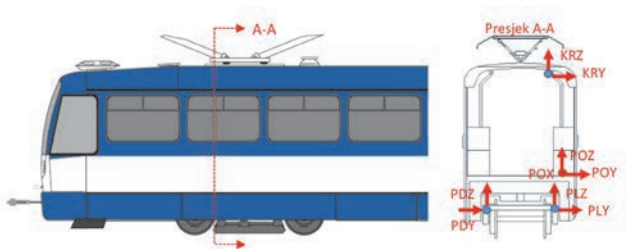
Slika 4. Situacijski plan dionice 2 sa smještajem poddionica

### 3.2. Mjerna oprema

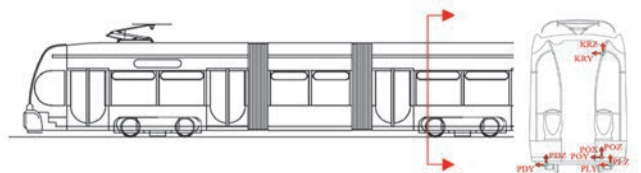
Prije provedbe ispitivanja na opisanim dionicama kolosijeka, tramvajsko vozilo iz redovnog prometa opremljeno je mjernom opremom za snimanje vibracija. Prijenosno računalo i višekanalni analizator vibracija (Brüel & Kjær, tip Pulse 3560C) smješteni su u putnički prostor te su instalirana četiri akcelerometra na okretno postolje vozila (Brüel i Kjær tip 4508) i tri akcelerometra u putničkom prostoru (Brüel i Kjær tip 4506 i 4507). Snimanje vibracija provedeno je s frekvencijom uzorkovanja 4096 Hz na ispitnoj dionici 1, odnosno 16384 Hz na ispitnoj dionici 2. Oba vozila bila su opremljena GPS prijnikom i Full HD kamerom (za prostornu orijentaciju, praćenje brzine vožnje i udaljenosti).

Akcelerometri na okretnom postolju smješteni su u blizini kotača na lijevoj i na desnoj strani postolja, u vertikalnom i u poprečnom smjeru. Tako je omogućena procjena utjecaja lijeve i desne tračnice. Radi ocjenjivanja udobnosti vožnje putnika koji stoji u putničkom prostoru, troosnim akcelerometrom na podu vozila mjerene su vibracije u uzdužnom, poprečnom i vertikalnom smjeru, a dva jednoosna akcelerometra postavljajeljena su na rukohvat pri vrhu kabine u vertikalnom i poprečnom smjeru.

Mjerna oprema je ugrađena na isti način na obje ispitne dionice, ali na različite vrste tramvajeva koje su tipične za pojedinu mrežu. U Osijeku je korišten tramvaj tipa T3PVO garažnog broja 0717 (slika 6.), a u Zagrebu tramvaj tipa TMK 2200 garažnog broja 2284, slika 7.



Slika 6. T3PVO (ČKD Praha) tramvaj i pozicije akcelerometara za ispitnu dionicu 1



Slika 7. TMK 2200 (Končar KEV) tramvaj i pozicije akcelerometara za ispitnu dionicu 2

Ispitivanja su provedena tijekom vožnje tramvajeva konstantnom brzinom (30 km/h za ispitnu dionicu 1 i 20 km/h za ispitnu dionicu 2) u svrhu usporedbe različitih segmenata kolosijeka i analize utjecaja stanja infrastrukture na udobnost vožnje. Sva ispitivanja su provedena u noćnom periodu, bez upletanja redovnog tramvajskog prometa i uz vrlo mali cestovni promet, kada je bilo moguće postići kontinuiranu vožnju s minimalnim zaustavljanjima.

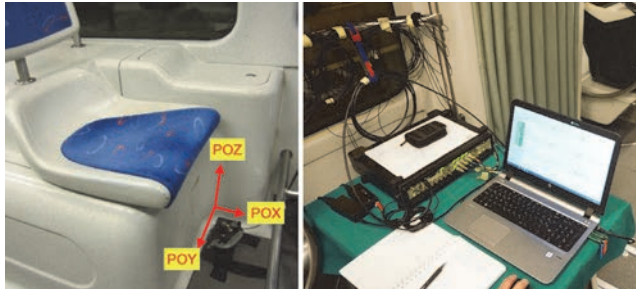


Slika 5. Zatvaranje kolosijeka na dionici 2 – AB ploče (lijevo), asfalt (u sredini), kameni agregat (desno)



### 3.3. Ocjena udobnosti vožnje

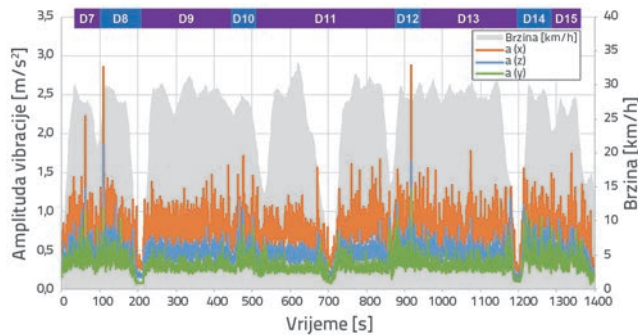
Da bi se ocijenila udobnosti vožnje prema prethodno opisanim postupcima, razmatrana su mjerenja akcelerometrom koji je postavljen na pod tramvaja (POX, POY i POZ), slika 8.



Slika 8. Položaj troosnog akcelerometra na podu vozila (lijevo), analizator vibracija (desno)

#### 3.3.1. Ekvivalentna razina vibracija ( $L_{aeq}$ )

Za ispitnu dionicu 1 ekvivalentne razine ubrzanja su određene za svaki segment (D7 do D15) na temelju izmjerenih ubrzanja za uzdužni, poprečni i vertikalni smjer (slika 9).



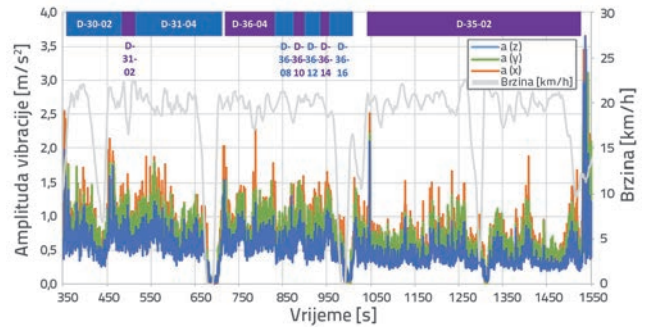
Slika 9. Izmjerene vibracije na segmentima kolosijeka - ispitna dionica 1

Tablica 9. Ekvivalentne razine vibracija i izračunani indeksi udobnosti vožnje ( $I_c$ ) - ispitna dionica 1

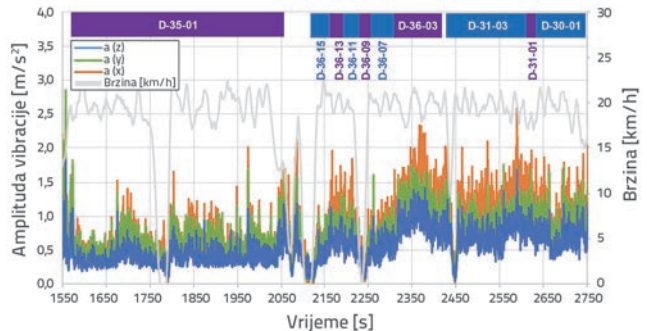
Segment	$L_{aeq(z)}$ [dB]	$L_{aeq(y)}$ [dB]	$L_{aeq(x)}$ [dB]	Indeks udobnosti vožnje ( $I_c$ )
D07	114,3	110,8	118,8	0,65
D08	115,1	111,0	119,3	0,75
D09	113,0	108,3	118,1	0,26
D10	114,3	109,9	118,8	0,57
D11	112,9	107,6	118,2	0,10
D12	114,6	110,5	118,8	0,74
D13	113,6	109,1	118,4	0,43
D14	114,1	109,7	118,3	0,55
D15	114,5	110,7	119,3	0,66

Zatim je indeks udobnosti vožnje ( $I_c$ ) izračunan na temelju određenih ekvivalentnih razina vibracija ( $L_{aeq}$ ) za sva tri smjera, tablica 9.

Indeks udobnosti vožnje  $I_c$  u tablici 9. relativna je mjera udobnosti na ljestvici od 0 do 1 (gdje 0 predstavlja najbolju udobnost i 1 predstavlja najlošiju udobnost u tramvaju), za svaki pojedini segment na temelju rezultata za cjelokupnu tramvajsku mrežu. Isti postupak određivanja ekvivalentnih razina vibracija primijenjen je i za ispitnu dionicu 2 – Zagreb. Rezultati su prikazani na slici 10. (istočni kolosijek) i slici 11. (zapadni kolosijek).



Slika 10. Izmjerene vibracije na segmentima kolosijeka - ispitna dionica 2, istočni kolosijek



Slika 11. Izmjerene vibracije na segmentima kolosijeka - ispitna dionica 2, zapadni kolosijek

Ekvivalentne razine ubrzanja za sva tri smjera određene su za svaki pojedini segment, a indeksi udobnosti vožnje  $I_c$  na temelju rezultata za cjelokupnu tramvajsku mrežu, gdje 0 predstavlja najnižu srednju razinu  $L_{aeq}$  i 1 najvišu srednju razinu  $L_{aeq}$  za svaki segment. Metoda je jednostavna za primjenu i daje općeniti pregled stanja udobnosti vožnje na cjelokupnoj tramvajskoj mreži [2]. Međutim, nedostaju granične vrijednosti koje bi opisale razinu udobnosti putnika. Glavna namjena ove metode je identificiranje segmenata kolosijeka s najvišim indeksima  $I_c$  gdje je utvrđena niska razina udobnosti vožnje i gdje se moraju provesti daljnja istraživanja geometrije kolosijeka i stanja infrastrukture.

#### 3.3.2. Sperlingov indeks $W_z$

Sperlingov indeks udobnosti određen je za vertikalni i poprečni smjer na temelju vršnih amplituda ubrzanja  $a_{1speak}$  [cm/s<sup>2</sup>]

Tablica 10. Ekvivalentne razine vibracija i izračunani indeksi udobnosti vožnje ( $I_c$ ) - ispitna dionica 2

Istočni kolosijek					Zapadni kolosijek				
Segment	$L_{aeq(z)}$ [dB]	$L_{aeq(y)}$ [dB]	$L_{aeq(x)}$ [dB]	Indeks ( $I_c$ )	Segment	$L_{aeq(z)}$ [dB]	$L_{aeq(y)}$ [dB]	$L_{aeq(x)}$ [dB]	Indeks ( $I_c$ )
D-30-02	118,3	120,7	121,4	0,4	D-30-01	117,0	119,6	120,6	0,4
D-31-02	115,8	118,8	118,8	0,3	D-31-01	118,5	121,1	122,8	0,4
D-31-04	115,7	118,2	118,2	0,3	D-31-03	116,3	118,7	121,2	0,4
D-36-04	116,6	119,5	120,2	0,4	D-36-03	118,0	120,8	122,4	0,4
D-36-08	114,9	117,5	117,6	0,2	D-36-07	115,2	117,6	118,6	0,3
D-36-10	118,1	120,9	121,2	0,3	D-36-09	113,6	116,3	116,9	0,1
D-36-12	114,8	118,1	118,6	0,2	D-36-11	115,6	117,9	120,3	0,3
D-36-14	117,2	119,7	120,5	0,3	D-36-13	116,0	118,5	120,2	0,2
D-36-16	112,9	116,5	116,8	0,2	D-36-15	113,3	116,6	116,8	0,2
D-35-02	110,6	114,1	114,2	0,0	D-35-01	111,7	115,0	115,3	0,1

u intervalima od jedne sekunde. Frekvenzijsko vrednovanje provedeno je u 19 terčnih pojava od 0,5 do 31,50 Hz s težinskim faktorima za vertikalni i poprečni smjer (tablica 11.). Nakon provedenog frekvenzijskog vrednovanja za pojedini terčni pojas prema izrazima (3) i (4), određen je indeks  $Wz_{tot,1s}$  za cijeli frekvenzijski opseg prema izrazima (16) i (17):

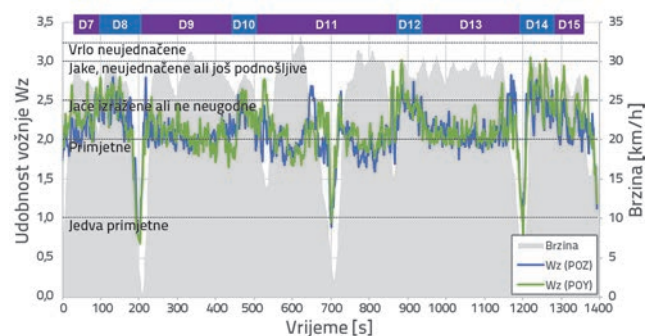
$$Wz_{tot,1s} = \sqrt[10]{Wz_1^{10} + Wz_2^{10} + \dots + Wz_{19}^{10}} \quad (\text{mirnoća hoda}) \quad (16)$$

$$Wz_{tot,1s} = \sqrt[6,67]{Wz_1^{6,67} + Wz_2^{6,67} + \dots + Wz_{19}^{6,67}} \quad (\text{udobnost vožnje}) \quad (17)$$

Tablica 11. Frekvenzijski opseg 19 terčnih pojava i težinski faktori za određivanje indeksa  $Wz$

Broj	Donja granica [Hz]	Središnja frekvencija (fc) [Hz]	Gornja granica [Hz]	Vertikalno, težinski faktor Bs	Poprečno, težinski faktor Bw
1	0,447	0,500	0,562	0,337	0,422
2	0,562	0,630	0,708	0,390	0,489
3	0,708	0,800	0,891	0,444	0,556
4	0,891	1,000	1,120	0,489	0,613
5	1,12	1,25	1,41	0,53	0,66
6	1,41	1,60	1,78	0,57	0,72
7	1,78	2,00	2,24	0,61	0,76
8	2,24	2,50	2,82	0,65	0,82
9	2,82	3,15	3,55	0,71	0,89
10	3,55	4,00	4,47	0,77	0,97
11	4,47	5,00	5,62	0,81	1,02
12	5,62	6,30	7,08	0,78	0,97
13	7,08	8,00	8,91	0,64	0,80
14	8,91	10,00	11,22	0,49	0,62
15	11,22	12,50	14,13	0,37	0,47
16	14,13	16,00	17,78	0,28	0,35
17	17,78	20,00	22,39	0,21	0,27
18	22,39	25,00	28,18	0,17	0,21
19	28,18	31,50	35,48	0,13	0,16

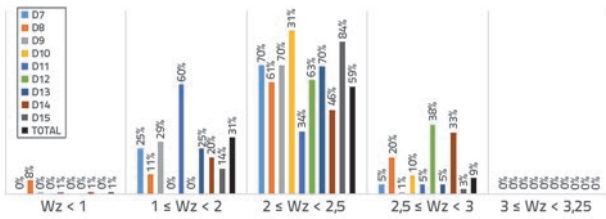
Indeks  $Wz_{tot,1s}$  prikazan na slici 12. ovisno o vremenu pokazuje Sperlingov indeks udobnosti vožnje za ispitnu dionicu 1, gdje su vibracije snimane pri srednjoj brzini vožnje 30 km/h. Prikazane su vrijednosti indeksa udobnosti vožnje samo za vertikalni i poprečni smjer, a metoda ne promatra uzdužne vibracije vozila.



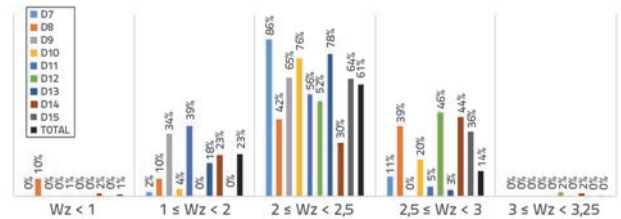
Slika 12. Sperlingov indeks udobnosti vožnje  $Wz$  za intervale od jedne sekunde na ispitnoj dionici 1

Na dijagramima Sperlingovog indeksa  $Wz$  jasno je moguće razlučiti kratke događaje koji premašuju određene granice udobnosti vožnje prema tablici 2. Preklapanjem takvih dijagrama s geometrijom tramvajskog kolosijeka, ili GPS podacima, određena mjesta na tramvajskoj pruzi mogu se identificirati i dalje ispitivati. Na primjer, na početku i na kraju segmenta kolosijeka D11 nalazi se zaokretnica s jakom zakrivljenosti tako da, unatoč maloj brzini vožnje, indeks udobnosti vožnje premašuje granicu 2,5 i čak dostiže granicu 3,0 (jake, neujednačene ali još podnošljive vibracije) u poprečnom smjeru. Jače izražene vibracije u poprečnom smjeru očekivane su na zaokretnicama. Međutim, nije jednostavno ocijeniti ukupno stanje pojedinog segmenta tramvajске pruge. Zato su rezultati za svaki segment analizirani u histogramima te su prikazane postotne vrijednosti indeksa  $Wz$  koje premašuju određene granice u vertikalnom smjeru (slika 13.) i horizontalnom smjeru (slika 14.).

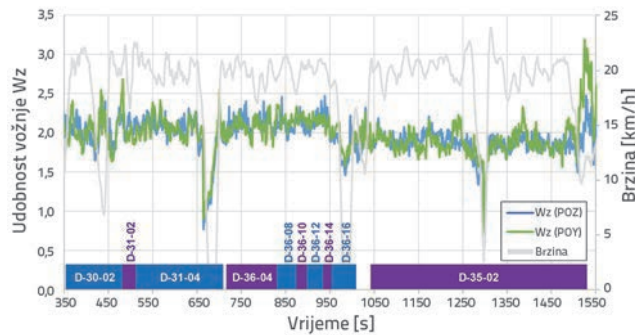




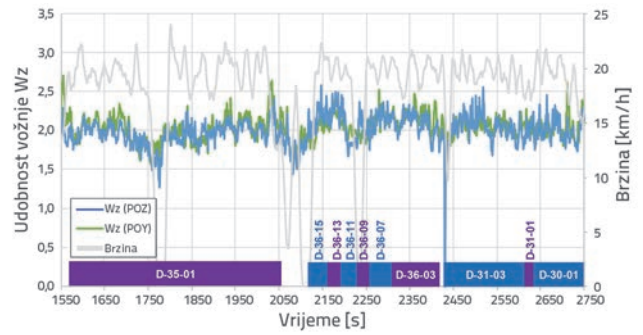
Slika 13. Distribucija indeksa udobnosti vožnje na ispitnoj dionici 1 u vertikalnom smjeru



Slika 14. Distribucija indeksa udobnosti vožnje na ispitnoj dionici 1 u poprečnom smjeru



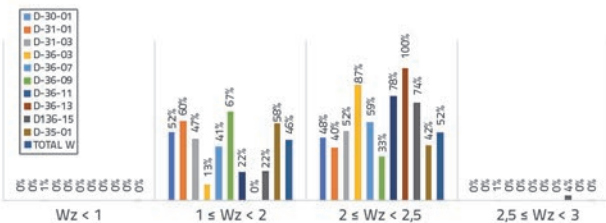
Slika 15. Sperlingov indeks udobnosti vožnje Wz na ispitnoj dionici 2, istočni kolosijek



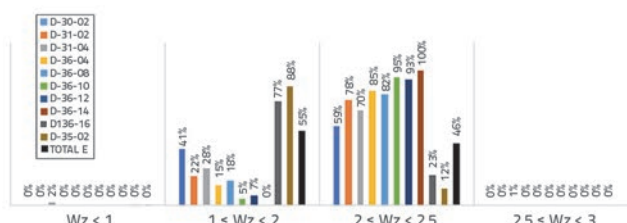
Slika 16. Sperlingov indeks udobnosti vožnje Wz na ispitnoj dionici 2, zapadni kolosijek

Na slikama 13. i 14. vidi se daje za većinu segmenata kolosijeka Sperlingov indeks udobnosti vožnje u granicama  $2 \leq Wz < 2,5$ . Radi se o jače izraženim vibracijama, ali nisu neugodne. Za segment D11 je indeks udobnosti vožnje većinom u granicama  $1 \leq Wz < 2$  (jedva primjetne do primjetne vibracije) i taj segment je kategoriziran kao najbolji segment s obzirom na udobnost vožnje i u vertikalnom i u poprečnom smjeru. U najlošijem stanju su segmenti kolosijeka D12 i D14 gdje je gotovo 50 % vremena indeks udobnosti vožnje u granicama  $2,5 \leq Wz < 3$  (jake, neujednačene ali još podnošljive vibracije) uz naglašene poprečne vibracije s indeksom udobnosti vožnje u granicama  $3 \leq Wz < 3,25$  (vrlo neujednačene vibracije).

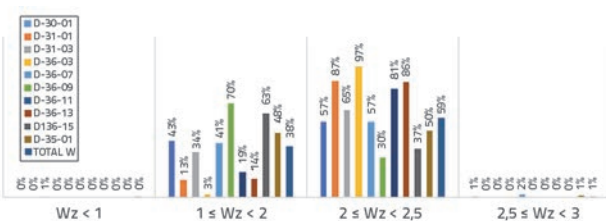
Isti postupak određivanja Sperlingovog indeksa udobnosti vožnje Wz primijenjen je i za ispitnu dionicu 2 u Zagrebu, gdje je srednja brzina vožnje tramvaja bila 20 km/h, slike 15. i 16. Na dijagramima je primjetna ovisnost indeksa Wz o brzini vožnje koji je znatno niži na ispitnoj dionici 2 zbog brzine vožnje 20 km/h. Za ocjenu i usporedbu indeksa udobnosti na pojedinim segmentima, uz rezultate ispitivanja pri konstantnoj brzini vožnje, potrebno je znati i stvarne uvjete na pruzi. Primjetna je razlika u iznosima indeksa Wz kod segmenata D-35-01 i D-35-02 u odnosu na ostale segmente kod kojih je indeks Wz uglavnom iznad granice 2,0 (primjetne vibracije). Za detaljniji uvid u distribuciju indeksa Wz, rezultati za svaki segment analizirani su u histogramima na slikama 17. do 20.



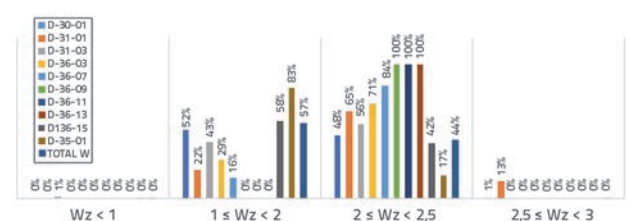
Slika 17. Distribucija indeksa Wz na ispitnoj dionici 2 u vertikalnom smjeru, zapadni kolosijek



Slika 18. Distribucija indeksa Wz na ispitnoj dionici 2 u poprečnom smjeru, istočni kolosijek



Slika 19. Distribucija indeksa Wz na ispitnoj dionici 2 u poprečnom smjeru, zapadni kolosijek

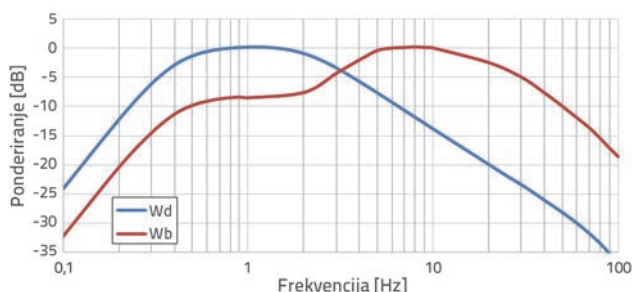


Slika 20. Distribucija indeksa Wz na ispitnoj dionici 2 u poprečnom smjeru, istočni kolosijek

### 3.3.3. Norma EN 12299

Na tramvajskom je kolosijeku primijenjena standardna metoda srednje udobnosti ( $N_{Mv}$ ) i metoda kontinuirane udobnosti ( $C_{Cx}$ ,  $C_{Cy}$ ,  $C_{Cz}$ ) kako bi se odredila metoda koja će se koristiti u dotičnim urbanim sredinama.

Vibracije su analizirane u frekvencijskom području primjenom krivulja za ponderiranje koje su zadane u normi [18]. Predložena je krivulja za ponderiranje Wb (za vertikalni smjer) i krivulja za ponderiranje Wd (za uzdužni i bočni smjer). Wd se temelji na normi ISO 2631-1 [10] dok je Wb neznatno modificirana krivulja koja se predlaže u normi ISO 2631-4 [11] te koja je definirana u normi EN 12299 [18], slika 21.

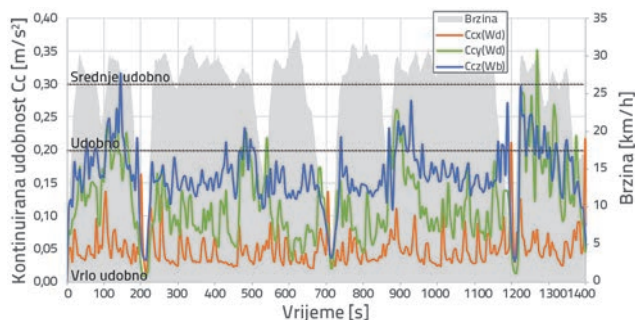


Slika 21. Ponderirane krivulje za uzdužni, bočni ( $W_d$ ) i vertikalni smjer ( $W_b$ ) [18]

Kako bi se izračunala kontinuirana udobnost ( $C_{Cx}$ ,  $C_{Cy}$ ,  $C_{Cz}$ ), trebaju se izračunati ubrzanja u petosekundnim intervalima ( $a_{POX}^{Wd}$ ,  $a_{POY}^{Wd}$ ,  $a_{POZ}^{Wb}$  [ $m/s^2$ ]) i to prema izrazu (18):

$$a_{X_i}^{W_x} = \left[ \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left( a_{W_i}(t) \right)^2 dt \right]^{0.5}, T = 5s \tag{18}$$

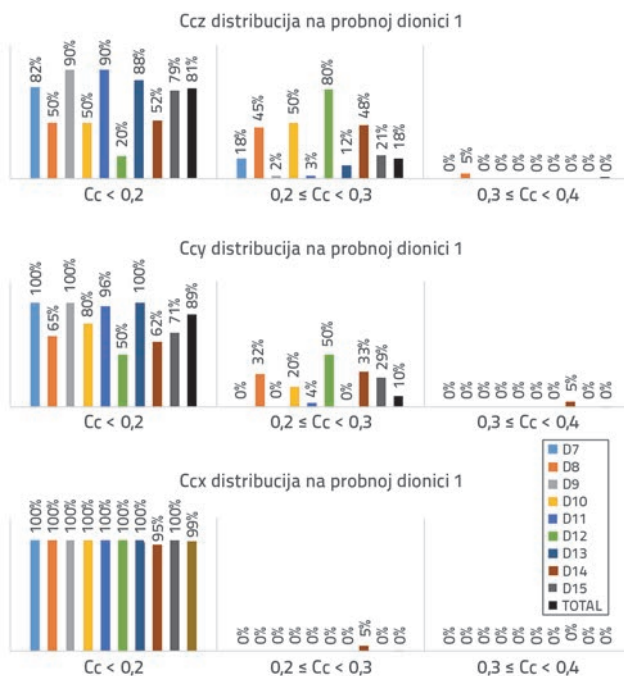
Vrijednosti  $a_{X_i}^{W_x}$  koriste se prema izrazima  $a_{POX}$  (uzdužno),  $a_{POY}$  (bočno) i  $a_{POZ}$  (vertikalno) označavaju se prema (8), (9) i (10) kao  $C_C$ . Za dionicu 1 te su vrijednosti prikazane na slici 22. u obliku vremenskog dijagrama.



Slika 22. Kontinuirana udobnost ( $C_{Cx}$ ,  $C_{Cy}$ ,  $C_{Cz}$ ) na ispitnoj dionici 1

Jasno se može vidjeti da udobnost u smjeru X, iako općenito niska, raste pri svakom kočenju vozila, što proizlazi iz uzdužnih ubrzanja. Najizraženije su vibracije u vertikalnom smjeru ali,

općenito uzevši, prema ljestvicama za ocjenjivanje (tablica 5.), vožnja je ocijenjena kao vrlo udobna (ispod  $0,2 m/s^2$ ). Pritom su neke vrijednosti varirale od 0,2 do 0,3 što ulazi u kategoriju "udobno". Samo nekoliko vrijednosti prelazilo je granicu od 0,3 u vertikalnom i bočnom smjeru (srednje udobno). Međutim, jasno se može uočiti da su najmanje udobne dionice D8, D10, D12 i D14, a dionice D9, D11 i D13 su najudobnije. Histogrami kontinuirane udobnosti izračunani su na razini poddionica. Histogram ispitne dionice 1 prikazan je na slici 23.



Slika 23. Vrijednosti kontinuirane udobnosti na različitim poddionicama ispitne dionice 1

Može se uočiti da većina vrijednosti ulazi u područje "vrlo udobno" ( $C_C$  do  $0,2 m/s^2$ ), pri čemu vertikalna udobnost više zadire u područje "udobno" sa samo nekoliko vrijednosti višim od  $0,3 m/s^2$  koje ulaze u područje "srednje udobno". Najmanji se problemi s udobnošću bilježe u uzdužnom smjeru, što je i logično jer je za potrebe mjerenja korištena kontinuirana brzina od 30 km/h s minimalnim ubravanjima i kočenjima. Najneudobnija je dionica D12, a najudobnije su dionice D9 i D11.

Vrijednosti kontinuirane udobnosti korištene su u standardnoj metodi srednje udobnosti za izračunavanje vrijednosti  $N_{Mv}$  kao 95. percentila petominutnih dionica prema izrazu (7), te u cjelovitoj metodi srednje udobnosti za putnike koji stoje  $N_{VD}$  na bazi 50. percentila istih vrijednosti a prema izrazu (15), tablica 12.

Prema ljestvici za ocjenjivanje iz tablice 6., 4 od 5 petominutnih intervala ulazi u područje "udobno", a posljednja dionica ulazi u područje "srednje udobno". Vrijednost  $N_{VD}$  ne razlikuje se bitno od vrijednosti  $N_{Mv}$  kod petominutnih intervala na ispitnoj dionici 1.

Tablica 12. Standardna metoda srednje udobnosti  $N_{MV}$  i cjelovita metoda  $N_{VD}$  na probnoj dionici 1

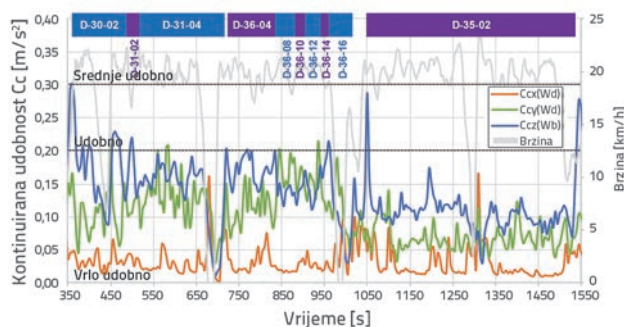
Vrijeme [s]	$a_{POZ95}^{W_b}$	$a_{POY95}^{W_d}$	$a_{POX95}^{W_d}$	$N_{MV,POZ}$	$N_{MV,POY}$	$N_{MV,POX}$	$N_{MV}$	$a_{POZ50}^{W_b}$	$a_{POY50}^{W_d}$	$a_{POX50}^{W_d}$	$N_{VD}$
0-299	0,25	0,23	0,13	1,48	1,35	0,78	<b>2,15</b>	0,16	0,12	0,04	<b>2,17</b>
300-599	0,21	0,20	0,08	1,27	1,21	0,51	<b>1,83</b>	0,15	0,10	0,04	<b>1,90</b>
600-899	0,22	0,24	0,08	1,31	1,44	0,48	<b>2,00</b>	0,14	0,08	0,04	<b>1,99</b>
900-1199	0,24	0,18	0,10	1,41	1,10	0,59	<b>1,88</b>	0,16	0,11	0,04	<b>1,88</b>
1200-1400	0,25	0,29	0,20	1,52	1,72	1,19	<b>2,59</b>	0,19	0,16	0,06	<b>2,73</b>

Iz dijagrama se vidi da udobnost na ispitnoj dionici 2 varira od "vrlo udobno" do "udobno". Najbolja udobnost zabilježen je na dionicama D-35-01 i D-35-02 na kojima je nedavno obavljena rekonstrukcija.

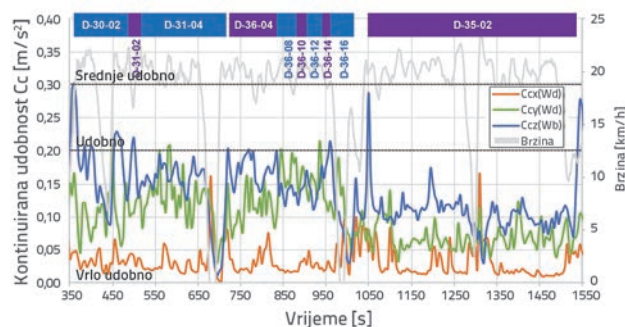
Histogrami kontinuirane udobnosti na razini poddionica izračunan su i prikazani za ispitnu dionicu 1 (slika 26.). Iz tih se histograma jasno može uočiti u kojoj mjeri udobnost ulazi u kategoriju "vrlo udobno" (do 0,2 m/s<sup>2</sup>) ili "udobno" (0,2 do 0,3 m/s<sup>2</sup>). Vrijednosti za kategoriju "udobno" uglavnom se bilježe u vertikalnom smjeru, s tim da je dionica D-36-11 najneudobnija s više od 50 % vrijednosti u kategoriji "udobno".

Rezultati za ispitnu dionicu 2, dobiveni standardnom metodom srednje udobnosti  $N_{MV}$  i cjelokupnom metodom srednje udobnosti  $N_{VD}$  (za putnike koji stoje), prikazani su u tablici 13.

Iz tablica za ocjenjivanje vidljivo je da u obje metode svi osim jednog šestominutnog intervala, ulaze u kategoriju "udobno" iz tablice 6. Jedna dionica (1200 s – 1499 s) ulazi u kategoriju "vrlo udobno". Ovim intervalom obuhvaćena je većina poddionice D-35-02 koja je nedavno obnovljena. Općenito uzevši, može se uočiti da su rezultati  $N_{MV}$  malo viši od rezultata  $N_{VD}$ , ali taj trend nije zabilježen u svim intervalima.



Slika 24. Kontinuirana udobnost ( $C_{cx}$ ,  $C_{cy}$ ,  $C_{cz}$ ) na ispitnoj dionici 2, istočni kolosijek

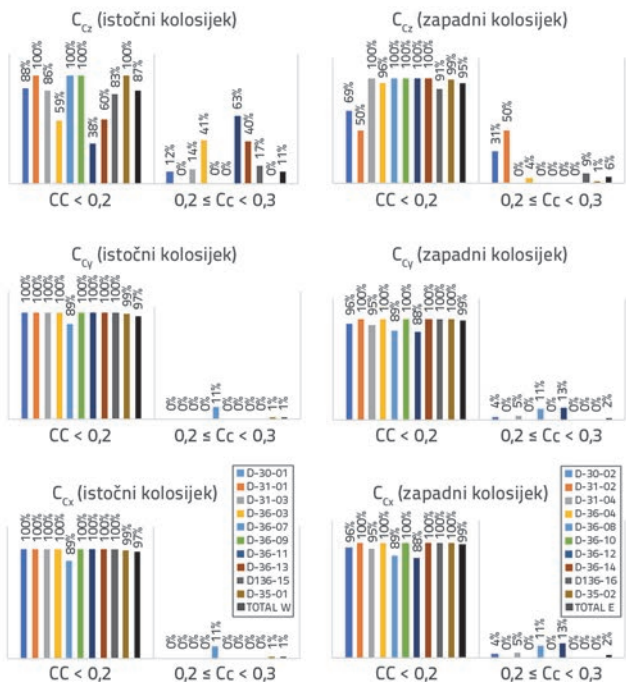


Slika 25. Kontinuirana udobnost ( $C_{cx}$ ,  $C_{cy}$ ,  $C_{cz}$ ) na ispitnoj dionici 2, zapadni kolosijek

Tablica 13. Standardna metoda srednje udobnosti  $N_{MV}$  i cjelovita metoda  $N_{VD}$  na probnoj dionici 2

Vrijeme [s]	$a_{POZ95}^{W_b}$	$a_{POY95}^{W_d}$	$a_{POX95}^{W_d}$	$N_{MV,POZ}$	$N_{MV,POY}$	$N_{MV,POX}$	$N_{MV}$	$a_{POZ50}^{W_b}$	$a_{POY50}^{W_d}$	$a_{POX50}^{W_d}$	$N_{VD}$
0-299	0,28	0,17	0,09	1,66	1,02	0,52	<b>2,02</b>	0,16	0,10	0,04	<b>1,74</b>
300-599	0,30	0,20	0,06	1,81	1,22	0,37	<b>2,21</b>	0,16	0,12	0,03	<b>1,98</b>
600-899	0,20	0,19	0,08	1,19	1,12	0,47	<b>1,70</b>	0,15	0,12	0,02	<b>1,83</b>
900-1199	0,19	0,17	0,09	1,15	1,05	0,52	<b>1,64</b>	0,11	0,08	0,03	<b>1,56</b>
1200-1499	0,13	0,11	0,07	0,80	0,64	0,41	<b>1,10</b>	0,10	0,06	0,02	<b>1,06</b>
1500-1799	0,23	0,16	0,09	1,35	0,97	0,53	<b>1,75</b>	0,11	0,10	0,03	<b>1,56</b>
1800-2099	0,19	0,18	0,08	1,17	1,07	0,48	<b>1,66</b>	0,12	0,10	0,03	<b>1,67</b>
2100-1399	0,22	0,19	0,12	1,32	1,15	0,73	<b>1,90</b>	0,17	0,13	0,03	<b>1,96</b>
2400-2699	0,23	0,14	0,09	1,35	0,85	0,54	<b>1,69</b>	0,17	0,08	0,04	<b>1,53</b>
2700-3000	0,25	0,18	0,08	1,47	1,11	0,51	<b>1,91</b>	0,17	0,11	0,04	<b>1,87</b>





Slika 26. Histogrami kontinuirane udobnosti na poddionicama ispitne dionice 2

Očito je da te metode, bazirane na šestominutnim intervalima, nemaju visoku rezoluciju pogodnu za analizu tramvajskih mreža, a razlog tome je dužina mreža. Poddionice se ne mogu analizirati na bazi NVD-a i NMV-a. Drugim riječima, te metode omogućuju tek opći uvid u stanje udobnosti.

#### 4. Ocjena metoda za određivanje udobnosti vožnje na tramvajskim linijama

Nakon detaljne analize podataka pomoću tri metode, opisana je udobnost vožnje na dvije pispitne dionice tramvajskih mreža s kolosijekom širine 1000 mm. U tu su svrhu analizirani različiti postupci za mjerenje udobnosti. Usporedbe su provedene na temelju različitih parametara i kriterija kako bi se pronašla najprikladnija primjena za željeznice u gradskim uvjetima prometovanja.

##### 4.1. Raspon frekvencija, ponderiranje i smjer

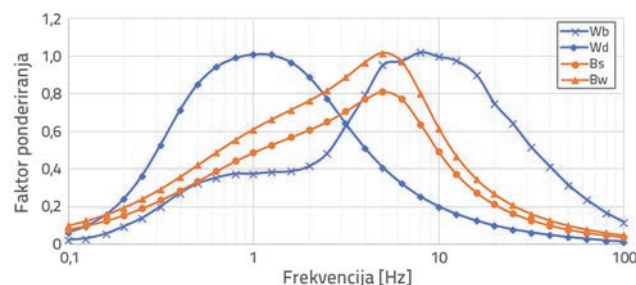
Svaka od tri opisane metode koristi drugačiji raspon frekvencija: U metodi koja se bazira na ekvivalentnoj razini vibracije koristi se raspon od 2 Hz do 200 Hz kako bi se mogli usporediti različiti segmenti kolosijeka i njihova svojstva kao što su naboranost tračnice i varovi tračnica te njihov utjecaj na udobnost.

U Sperlingovom indeksu udobnosti vožnje  $W_z$ , raspon varira od 0,5 Hz do 30 Hz, a zanemaruju se više frekvencije iako se zna da one utječu na percepciju putnika o vibracijama, što su pokazale razne studije [28]. Kao primjer možemo navesti da dominantni

frekvencijski odziv lošeg zavora na tramvajskom kolosijeku iznosi 50 Hz. Takvi događaji i njihov utjecaj na udobnost zanemaruju se u Sperlingovoj metodi [29].

Metoda prema normi EN 12299 temelji se na postupku ISO 2631 u kojem se navodi da je raspon frekvencija od 0,4 Hz do 100 Hz dovoljno velik; međutim, u nekim se studijama navodi da bi se trebala razmotriti primjena većeg raspona, čak i do 315 Hz [30].

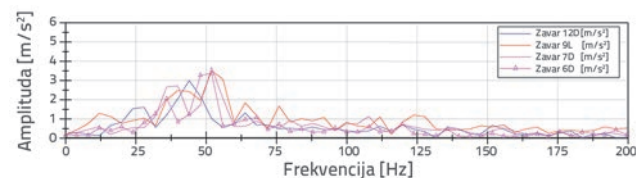
Što se tiče krivulja za ponderiranje, različiti ponderi se koriste za vertikalne i horizontalne smjerove za Sperlingov indeks udobnosti vožnje  $W_z$ , tj. za EN 12299. Usporedni prikaz daje se na slici 27.



Slika 27. Faktori ponderiranja prema Sperlingu (narančasto) i EN 12299 (plavo)

U svakoj se metodi za svaki smjer koristi drugačiji ponder frekvencija. U krivulji  $W_b$  koja se u EN 12299 koristi za vertikalni smjer, najviši ponder dodjeljuje se rasponu od 2 do 40 Hz sa sekundarnim pojasom od 0,3 do 3 Hz. U  $W_d$  krivulji za bočni i uzdužni smjer daje se raspon od 0,3 do 4 Hz, a vrlo se nizak ponder primjenjuje za visoke frekvencije vibracija. Iste se karakteristike bilježe u Sperlingovim ponderskim krivuljama  $B_s$  (vertikalno) i  $B_w$  (horizontalno). Međutim, vertikalni smjer je izraženiji pa tako imamo  $B_w(f) = 1.25 B_s(f)$ . U oba se slučaja bilježi vršna vrijednosti pri 5 Hz s vrlo strmim padom na višim frekvencijama.

Kao što je prije objašnjeno, za neke vrlo uobičajene događaje na tramvajskom kolosijeku, kao što je neodgovarajuća geometrija zavora tračnice, dominantna frekvencija ulazi u raspon od 40 do 60 Hz pri brzini od 20 do 30 km/h, što bi se zanemarilo na Sperlingovoj ponderskoj krivulji  $B_s$  za vertikalni smjer, slika 28.



Slika 28. FFT induciranih prolaskom vozila preko četiri zavora tračnica na ispitnoj dionici 2 [29]

Sperlingov se indeks ne koristi ni za uzdužne vibracije koje mogu bitno utjecati na udobnost u režimu vožnje stani-kreni



Tablica 14. Usporedba ljestvica za ocjenu udobnosti na temelju rezultata postignutih na probnoj dionici 1

Sperling Wz (5s)	POZ [%]	POY [%]	POZ [%]	POY [%]	EN 12299 Cc
Ljestvica					Ljestvica
Jedva zamjetljivo	1 %	1 %	83 %	83 %	Vrlo udobno
Jasno zamjetljivo	28 %	23 %	17 %	17 %	Udobno
Izraženije ali ne i neugodno	65 %	64 %	0 %	0 %	Srednja razina udobnosti
Jako, nepravilno ali još uvijek izdrživo	6 %	13 %			

na prometnim površinama na kojima se zajednički odvija tramvajski i cestovni promet. U ovom je istraživanju kao režim vožnje usvojena konstantna brzina s minimalnim ubrzanjima/kočenjima radi što bolje usporedbe i analize različitih poddionica. Ipak, u stvarnim uvjetima korištenja, u gustom tramvajskom prometu, može se očekivati da će uzdužne vibracije bitno utjecati na udobnost vožnje. To se jasno može uočiti na slikama na kojima se daje usporedni kontinuirani prikaz udobnosti ovisno o brzini vožnje, gdje je smjer POX (uzdužni smjer) naglašen na potezima na kojima dolazi do ubravanja i usporavanja tramvaja, slika 22.

### 4.2. Ljestvice za ocjenu udobnosti

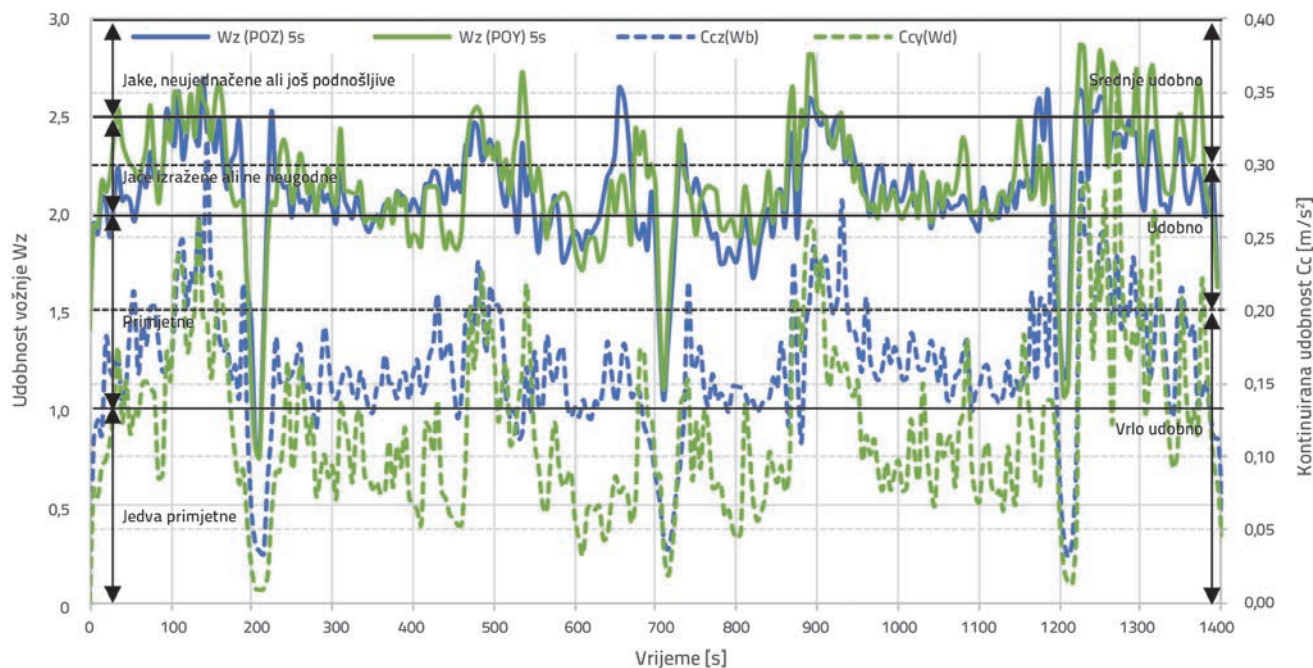
U Sperlingovom indeksu vožnje i u metodi prema EN 12299 iskazuju se ljestvice za ocjenjivanje percepcije ljudi o udobnosti na bazi istraživanja provedenih na stvarnim putnicima. U sljedećoj usporedbi, gdje se Sperlingov indeks uprosječuje u petosekundnim intervalima kako bi se mogao usporediti s metodom kontinuirane udobnosti (EN 12299), razine udobnosti

izmjerene pomoću te dvije metode analiziraju se na ispitnoj dionici 1, slika 29.

Kao što se može uočiti na prethodnoj slici, u odnosu na ljestvice Sperlingovog indeksa, metoda prema EN 12299 ima tendenciju podcjenjivanja udobnosti, naročito u bočnom smjeru (POY). Većina vrijednosti ulazi u kategoriju "vrlo udobno" dok se u slučaju Sperlingovog indeksa Wz većina vrijednosti kategorizira kao "izraženije", ali ne i neugodno" pri čemu 65 % vrijednosti ulazi u kategoriju "jako, nepravilno ali još uvijek izdrživo", tablica 14. Takvo je ponašanje opisano i u istraživanju provedenom na standardnim željezničkim trasama [31].

### 4.3. Ocjenjivanje i rangiranje poddionica

Za ocjenjivanje stanja infrastrukture može se primijeniti norma EN 12299, gdje su definirane metoda kontinuirane udobnosti i metoda  $N_{MV}$  kako je to prikazano u tablici 4. Prema pristupu usvojenom u ovom radu, isto se redovno vozilo koristi na svakoj ispitnoj dionici za sve poddionice te se, osim toga, mjerenja



Slika 29. Usporedba Sperlingovog indeksa udobnosti vožnje Wz (5s) i metode kontinuirane udobnosti (EN 12299) s ljestvicama za ocjenjivanje (probna dionica 1)

Tablica 15. Proračun ukupne ponderirane vrijednosti  $W_z$  za poddionicu D7 probne dionice 1

Smjer	POZ			POX			POY		
	$C_c < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$
Razina	$C_c < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$
Histogram $W_z$ [%]	82 %	18 %	0 %	100 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %
Ponder	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ponderirana vr, $W_z$	0,82	0,35	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Ponderirani prosjek $W_z$	0,20			0,17			0,17		
<b>Ukupna ponderirana vrijednost <math>W_z</math></b>	<b>0,54</b>								

Tablica 16. Proračun ukupne ponderirane vrijednosti  $C_c$  za poddionicu D7 probne dionice 1

Smjer	POZ			POX			POY		
	$C_c < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$
Razina	$C_c < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$	$CC < 0,2$	$0,2 \leq C_c < 0,3$	$0,3 \leq C_c < 0,4$
Histogram $W_z$ [%]	82 %	18 %	0 %	100 %	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %
Ponder	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ponderirana vr, $W_z$	0,82	0,35	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Ponderirani prosjek $W_z$	0,20			0,17			0,17		
<b>Ukupna ponderirana vrijednost <math>W_z</math></b>	<b>0,54</b>								

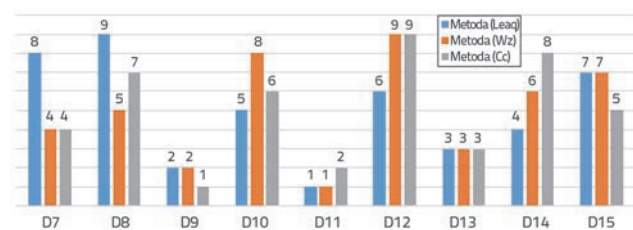
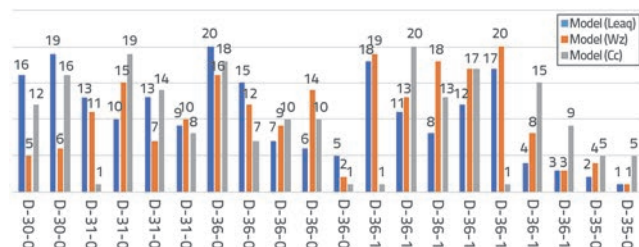
obavljaju pri konstantnoj brzini kako bi se moglo usporediti stanje infrastrukture na različitim ispitnim dionicama. To je međutim bio značajan izazov zbog različitih karakteristika kolosijeka i samih poddionica. Poddionice su podijeljene po vrsti gornjeg ustroja i po godini posljednje rekonstrukcije (tablice 7. i 8.). Međutim, treba napomenuti da i neki drugi parametri, kao što su zakrivljenost, dužina dionice, zajednička površina za tramvaj i cestovna vozila itd., također variraju na analiziranim dionicama. Osim toga, konstantna brzina nije se mogla postići po čitavoj dužini dionica zbog zaustavljanja na semaforu, usporavanja na oštrim zavojima itd.

Stoga je usvojena ekvivalentna razina vibracija kako bi se na odgovarajući način rangirale poddionice na cjelokupnim tramvajskim mrežama.

U Sperlingovoj se metodi predlaže jednadžba za izračunavanje indeksa  $W_z$  za proizvoljni interval mjernih podataka, ali ne i za ocjenu svih smjerova zajedno u istoj jednadžbi. Zato je za određivanje razine udobnosti na svakoj poddionici korišten histogramski pristup (slike 13. do 20.).

Iako se u metodi iz norme EN 12299 predlaže samo jedna vrijednost udobnosti, i to u obliku vrijednosti  $N_{MV}$  ili  $N_{VD}$  u toj se metodi ne daje način proračuna za proizvoljnu dužinu ispitne dionice. Vrijednosti  $N_{MV}$  i  $N_{VD}$  izračunavaju se na bazi petminutnih intervala, a to je razdoblje suviše dugo za ocjenjivanje poddionica u tramvajskim mrežama. Stoga se može koristiti za rangiranje pojedinačnih poddionica pomoću histograma (slike 22. do 25.). Rangiranje je provedeno na bazi pondera dodijeljenih svakoj razini udobnosti u Sperlingovoj metodi i u metodi prema normi 12299. Najmanja razina udobnosti ima ponder 1, a svaka sljedeća razina ima ponder  $1+n$ , kako je prikazano u tablicama 15. i 16.

Konačna vrijednost za svaku ispitnu dionicu temelji se na ukupnoj ponderiranoj vrijednosti  $W_z$  za Sperlingovu metodu, te na ukupnoj ponderiranoj vrijednosti  $C_c$  za metodu prema EN 12299. Rangiranje za metodu ekvivalentne razine vibracija bazira se na indeksu udobnosti vožnje  $I_c$  (tablice 9. i 10.). Prema rangiranju koje je na ispitnoj dionici 1 obavljeno pomoću tri različite metode (slika 30.), utvrđeno je da na većini

Slika 30. Rangiranje poddionica za probnoj dionici 1 prema tri različite metode, Laeq,  $W_z$ ,  $C_c$ Slika 31. Rangiranje poddionica za probnoj dionici 2 prema tri različite metode, Laeq,  $W_z$ ,  $C_c$

poddionica postoji vrlo dobra korelacija između metoda Wz i Cc. Na ispitnoj dionici 2 (slika 31.) većina dionica ispitanih metodom iz norme EN 12299 ulazi u razinu 1 "vrlo dobra udobnost" zbog niže brzine tramvaja i vrlo kvalitetnog ispitnog vozila (tramvaj TMK 2200). Zato su te dionice rangirane vrlo visoko za razliku od Sperlingovog indeksa ili metode ekvivalentne razine vibracija, a razlog su drugačije razine rangiranja. Zbog te je činjenice utvrđeno da bolja korelacija postoji između metoda Laeq i Wz.

## 5. Zaključak

U radu se daje opsežan pregled metoda za ocjenjivanje udobnosti vožnje u željezničkim vozilima. Istraživanje se bazira na ideji o ocjenjivanju udobnosti na tramvajskoj mreži, gdje se parametri poput konstrukcije kolosijeka, uvjeta vožnje, brzine itd. bitno razlikuju od odgovarajućih parametara na tradicionalnim željezničkim mrežama.

Ispitne dionice odabrane su nakon analize vibracijskih podataka izmjerenih pomoću redovnog tramvajskog vozila na više od 150 km tramvajske pruge u Zagrebu i Osijeku [1, 2]. Analizirani parametri su ubrzanje izmjereno na podu tramvaja u tri smjera (vertikalno, bočno i uzdužno), brzina i geografski položaj (pomoću GPS-a). Ti su parametri korišteni za izračunavanje udobnosti vožnje prema sljedećim metodama: metodi Sperlingov indeks vožnje ( $Wz$ ), metodi ekvivalentna razina vibracija ( $L_{aeq}$ ) i metodi opisanoj u normi EN 12299 (baziranoj na normi EN ISO 2631), a to su metoda kontinuirane udobnosti ( $C_{cv}$ ,  $C_{cy}$ ,  $C_{cz}$ ), standardna metoda ( $N_{MV}$ ) i cjelovita metoda ( $N_{VD}$ ). U svim se metodama koristi isti niz podataka izmjerenih 2016. godine na tramvajskoj mreži u Osijeku (ispitna dionica 1) i 2018. godine na tramvajskoj mreži u Zagrebu (ispitna dionica 2). Ispitivanja su provedena u uvjetima kontinuirane vožnje (30 km/h u Osijeku i 20 km/h u Zagrebu) kako bi se ocijenile i međusobno usporedile poddionice pri konstantnoj brzini pomoću kontrolnog vozila.

Ispitane su i međusobno uspoređene različite metode za ocjenjivanje udobnosti vožnje kako bi se ustanovio optimalan postupak za ocjenu udobnosti vožnje u tramvaju. Može se zaključiti da je metoda "ekvivalentna razina vibracija" ( $L_{aeq}$ ) vrlo moćno sredstvo za međusobno uspoređivanje tramvajskih poddionica. Ona omogućuje jasno određivanje stanja duž čitave mreže te prikladno definiranje dionica na koje se treba obratiti posebna pažnja tj. na kojima se trebaju obaviti određene intervencije u svrhu poboljšanja razine udobnosti. Kako ubrzanja nisu ponderirana a raspon frekvencija je širok (do 200 Hz), metoda je osjetljivija na vibracije viših frekvencija. Prema [30], te se vibracije mogu također smatrati bitnima za udobnost vožnje, naročito za putnike koji stoje, što je najčešće slučaj u tramvajskim mrežama, naročito za vrijeme prometnih gužva. U metodi nisu predviđeni stupnjevi za ocjenjivanje razine udobnosti na temelju ljudske percepcije vibracija.

Sperlingova metoda indeksa vožnje Wz vrlo je prikladna za ocjenjivanje tramvajske infrastrukture. U metodi se za određivanje udobnosti iskazuju vrlo detaljne razine. Osim udobnosti, metoda se koristi i za određivanje mirnoće hoda. Moguće je i rangiranje

poddionica na temelju histogramskih vrijednosti u svrhu određivanja nekoliko razina udobnosti. Ova metoda ne omogućuje mjerenje udobnosti u uzdužnom smjeru. Za ocjenjivanje udobnosti pri konstantnoj brzini, što je i provedeno u slučaju opisanom u ovom radu, vertikalni i bočni smjerovi su dovoljni. Međutim, ako se udobnost određuje u redovnom pogonu na tramvajskim linijama na kojima se promet često odvija u režimu stani-kreni, naročito na dionicama sa zajedničkim tramvajskim i cestovnim prometom, uzdužni smjer ipak je vrlo značajan za određivanje udobnosti vožnje. Jedno od ograničenja je i niski raspon frekvencija (do 30 Hz), jer se u tom slučaju eliminiraju vibracije zbog određenih nepravilnosti u kolosijeku, kao što su greške u zavarivanju tračnica (opisane u točki 4) koje bitno utječu na udobnost, naročito na tramvajskim mrežama na kojima geometrija zavera nije strogo kontrolirana tijekom građenja te gdje brušenje varova nije adekvatno provedeno.

Metode opisane u EN 12299 dobro su dokumentirane i dostatne za ocjenjivanje udobnosti vožnje na željezničkim kolosijecima. U metodama  $N_{MV}$  i  $N_{VD}$  za ocjenu udobnosti koriste se petominutni uzorci. Samo se u te dvije metode daje integralna formula za izračunavanje ukupne razine udobnosti za sva tri smjera, vidi izraze (10) i (15). Iako te metode sadrže potrebne alate i ljestvice za izračunavanje ukupne razine udobnosti, u njima se ipak javljaju i neki nedostaci. U metodi  $N_{MV}$  koristi se 95. percentil pa se tako isključuju sve osim pet najviših vrijednosti udobnosti u petominutnim intervalima. To može dovesti do krive interpretacije stanja na dionicama, što je i objašnjeno u radovima [24, 31]. Osim toga, uzorak je prevelik za praktičnu primjenu na tramvajskim kolosijecima jer su potezi pruge sa sličnim svojstvima obično kraći od ekvivalenta od ~1,5 km, što je prosjek udaljenosti koju tramvaj prijeđe u pet minuta (ako vozi brzinom od 30 km/h). Stoga ove metode, iako su pogodne za primjenu na uobičajenim željezničkim kolosijecima, ipak nisu dovoljno detaljne za primjenu na mrežama poput onih opisanih u ovom radu.

S druge strane, metoda kontinuirane udobnosti opisana u normi EN 12299 (ekvivalentna metodi iz norme ISO 2631) pruža dostatnu petosekundnu uprosječenu razinu vibracija u sva tri smjera. U njoj se daju ljestvice za ocjenjivanje vertikalnih i bočnih smjerova. Metoda je pogodna za praktičnu primjenu na tramvajskim linijama, i to naročito zbog raspona frekvencija koji je veći od raspona prema Sperlingovoj metodi (do 100 Hz).

U usporedbi sa Sperlingovom metodom, ocjenom udobnosti pomoću predložene ljestvice podcjenjuje se razina udobnosti na tramvajskim kolosijecima. To je očitije na ispitnoj dionici 2 zbog niže prosječne brzine vozila tijekom prikupljanja podataka (20 km/h), gdje 95 % od svih vrijednosti ulazi u kategoriju "vrlo udobno". Slično se zapažanje daje u [31] gdje se prikazuje slična usporedba za standardne željezničke kolosijeke. Zbog toga je metoda nepraktična za međusobno uspoređivanje ispitnih dionica, jer se kod većine poddionica bilježi ista razina udobnosti. Kako bi ta metoda postala u punoj mjeri primjenjiva za tramvajski promet, trebalo bi provesti analizu razina udobnosti anketiranjem putnika u svrhu određivanja stvarno primjenjivih razina.

U radu se predlaže metoda za rangiranje različitih poddionica utemeljena na histogramskom pristupu prema kojem se, u

određivanju broja petosekundnih intervala koji ulaze u svaku razinu udobnosti, koriste različite granice udobnosti. Na temelju takvog pristupa, metoda Sperlingovog indeksa vožnje i metode kontinuirane udobnosti mogu se koristiti za ocjenjivanje sveukupne razine udobnosti na poddionicama tramvajske infrastrukture.

Udobnost putnika trebao bi svim upraviteljima željezničke/tramvajske mreže biti vrlo značajan parametar. Prikladnim vrednovanjem tog parametra mogao bi se privući veći broj putnika i generirati dohodak, te bi se isto tako mogle uočiti i nepravilnosti

na kolosiječnoj infrastrukturi ili na tračničkim vozilima. Na ljudsku percepciju udobnosti utječe više parametara, pa se ona stoga može vrlo teško objektivno mjeriti. U nekim se metodama daju alati i ljestvice za određivanje udobnosti u tračničkim vozilima. Za potrebe tramvajskog prometa, metoda kontinuirane udobnosti prikazana u EN 12299, predstavlja prikladno sredstvo za ocjenjivanje udobnosti putnika. Osim toga, u budućnosti bi se trebale provesti dodatne analize tih vrsta mreža kako bi se omogućilo bolje razumijevanja i prikladnije određivanje razine udobnosti u ovom segmentu prometa.

## LITERATURA

- [1] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M., Grgić, V., Vranešić, K., Koščak, J., Bogut, M.: Analiza stanja tramvajskog kolosijeka na mreži GPP-a Osijek, Zagreb, 2016.
- [2] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M., Bartolac, M., Bogut, M., Damjanović, D., Džambas, T., Grgić, V., Ivančev, M., Koščak, J., Vranešić, K.: Study on the tram traffic development in Zagreb, Report I Analysis of Tramway Track Condition, Zagreb, 2019.
- [3] Dumitriu, M., Gheti, M.A.: Evaluation of the ride quality and ride comfort in railway vehicles based on the index  $W_z$ , Annals of the faculty of engineering hunedoara - International journal of engineering, vol. 13, no. 3, pp. 123–132, 2015.
- [4] Tešić, P., Jovanović, S., Dick, M.: Analysis of vehicle/track interaction measurement data using the V/TI Monitor system, GRADEVINAR, 70 (2018) 2, pp. 105–119, <http://dx.doi.org/10.14256/JCE.2067.2017>.
- [5] Ward, C.P., Weston, P.F., Stewart, E.J.C., Li, H., Goodall, R.M., Roberts, C., Mei, T.X., Charles, G., Dixon, R.: Condition monitoring opportunities using vehicle-based sensors, pp. 202–218, 2010, <http://dx.doi.org/10.1177/09544097JRRT406>.
- [6] Haladin, I., Lakušić, S., Duvnjak, I.: Evaluation of tramway overhead line system in city of Osijek, in MATEC Web of Conferences, MET'2017, pp. 1–4, vol. 180, Warsaw, 2018, <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201818006003>.
- [7] Strandemar, K.: On Objective Measures for Ride Comfort Evaluation, Royan Institute of Technology (KTH), 2005.
- [8] Lakušić, S., Ahac, M.: Vibracije od željezničkog prometa, in Gospodarenje prometnom infrastrukturom, (ur. Lakusic, S.), Zagreb: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2009, pp. 373–418.
- [9] Bonin, G., Cantisani, G., Carbonari, M., Pancotto, A.: Railway traffic vibrations: generation and propagation-Theoretical aspects, 4th International SIV Congress - Palermo, Italy 12-14 September 2007, pp. 1–15, 2007, Available: [http://www.siiv.net/site/sites/default/files/Documenti/palermo/63\\_2848\\_20080120200834.pdf](http://www.siiv.net/site/sites/default/files/Documenti/palermo/63_2848_20080120200834.pdf).
- [10] HRN EN ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1: General requirements, . 1997.
- [11] HRN EN ISO 2631-4:2010 Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotation motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport syst, . 2010.
- [12] Eitzenberger, A.: Train-induced Vibrations in Tunnels – A Review, 2008.
- [13] Esveld, C.: Modern railway track, Second edi. Delft: TU Delft, 2001.
- [14] Gangadharan, K.: Experimental and analytical ride comfort evaluation of a railway coach, in Proceedings of the A conference & exposition on structural dynamics, pp. 1–15, 2004, Available: <http://im1.indiarailinfo.com/NEXT/NEXT/1048333/15799330/semorgimacxxiiconfs20p08experimentalanalyticalride.pdf>.
- [15] He, Y., Li, Z.: Analysis of the influence of track quality for new and existing urban railway lines on train operation, WIT Transactions on the Built Environment, vol. 135, pp. 291–302, 2014, <http://dx.doi.org/10.2495/CR140231>.
- [16] Meško, B., Orešković, G., Kurelac, G.: Testing tramway track dynamic properties in Zvonimirova street, Zagreb, 1997.
- [17] HRN ISO 5805:2016 Mechanical vibration and shock - Human exposure - Vocabulary (ISO 5805:1997), . 2016.
- [18] HRN EN 12299:2009 Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation (EN 12299:2009), . 2009.
- [19] Haladin, I., Lakusic, S., Bogut, M.: Analysis of tram traffic vibrations in respect to tram track structure and exploitation period, in 20th International Congress on Sound and Vibration 2013, ICSV 2013, pp. 7–11, vol. 4, no. July, Bangkok, Thailand: International Institute of Acoustics and Vibration, 2013.
- [20] Haladin, I., Lakusic, S., Koscak, J., Bartolac, M.: Monitoring of dynamic properties of new type of tram track fastening systems under traffic load, 4<sup>th</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2016, Road and rail infrastructure IV, (ed. Lakusic, S.), pp. 791–799, Šibenik: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2016.
- [21] Garg, V. K., Dukkipati, R. V.: Dynamics of railway vehicle systems. London: Academic Press, 1984.
- [22] Nastac, S., Picu, M.: Evaluating methods of whole-body-vibration exposure in trains, Ann."Dunarea De Jos" Univ. Galati, Fasc. XIV Mech. ..., 6841 (2010) 1987, Available: [http://www.ann.ugal.ro/im/anale2010/volumul\\_ii/I10\\_c.pdf](http://www.ann.ugal.ro/im/anale2010/volumul_ii/I10_c.pdf).
- [23] Azzoug, A., Kaewunruen, S.: Ride Comfort: A Development of Crowdsourcing Smartphones in Measuring Train Ride Quality, Frontiers in Built Environment, 3 (2017) February, pp. 1–12, 2017, <http://dx.doi.org/10.3389/fbuilt.2017.00003>.
- [24] Kufver, B., Persson, R., Wingren, J.: Certain aspects of the CEN standard for the evaluation of ride comfort for rail passengers, WIT Transactions on the Built Environment, 114 (2010), pp. 605–614, <http://dx.doi.org/10.2495/CR100561>.



- [25] HRN EN ISO 2631-2:2003 Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1-80Hz), , vol. 2003. pp. 1–18, 2003.
- [26] Orvnäs, A.: Methods for Reducing Vertical Carbody Vibrations of a Rail Vehicle: A Literature Survey. 2010.
- [27] Harborough, P.R.: Passenger comfort on high speed curving – analysis and conclusions, 1986.
- [28] Griffin, M.J., Erdreich, J.: Handbook of Human Vibration, vol. 90, no. 4. 2005.
- [29] Burnač, K.: Tramway vehicle vibration analysis in respect to track structure condition, Master thesis, University of Zagreb, 2019.
- [30] Morioka, M., Griffin, M.J.: Perception thresholds for vertical vibration at the hand, seat and foot, Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acustics, pp. 1577–1582, 2005.
- [31] Jiang, Y., Chen, B.K., Thompson, C.: A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299, International Journal of Rail Transportation, no. August, pp. 0–18, 2019, <http://dx.doi.org/10.1080/23248378.2019.1616329>.