

# Pregled metoda za određivanje utjecaja vibracija od prometovanja tramvajskih vozila na okolne građevine

Krešimir Burnać<sup>1</sup>, doc. dr. sc. Ivo Haladin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, kresimir.burnac@grad.unizg.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivo.haladin@grad.unizg.hr

## Sažetak

Zbog blizine tramvajskog kolosijeka, vibracije koje nastaju prilikom prolaska tramvajskog vozila izazivaju nelagodu osobama koje rade i borave u okolnim građevinama, a mogu imati štetan utjecaj i na same građevine. Mreža tramvajskih kolosijeka u gradu Zagrebu svojim velikim dijelom prolazi kroz uži centar grada gdje su na nekim mjestima udaljenosti kolosijeka od obližnjih građevina manje od 7 metara. Nakon potresa 2020. ova problematika još je od većeg značaja te se ona obrađuje u ovom radu. U radu su opisana i prethodna istraživanja koja sadrže više različitih metoda mjerenja (na kolosijeku, tramvajskom vozilu i zgradama) kao temelj za detaljnija istraživanja. Svrha mjerenja je uspostava modela koji bi definirao parametre (koji utječu na razine vibracija) vezane za različita tramvajska vozila i kolosijek, predviđao kretanje razina vibracija u vremenu i njihovo širenje kroz okolno tlo te na koji način takve vibracije utječu na okolne građevine. Takav model bio bi direktni indikator i uputa upravitelju tramvajске infrastrukture kako optimizirati potrebne radove na održavanju i na taj način dodatno smanjiti troškove održavanja mreže.

*Cljučne riječi: vibracije, tramvajski promet, građevine, optimizacija, održavanje*

## An overview of methods for determining the impact of vibrations from tramway vehicles on nearby buildings

### Abstract

Vibrations from tramway operations can potentially cause discomfort for the building residents and occupants and can be dangerous for buildings themselves because of their proximity to the tramway track. Big part of the Zagreb tramway traffic network is located within the historic city centre, at some locations distanced less than 7 meters away from the buildings. Since earthquake in 2020 this issue is even more relevant, and it is processed in detail in this paper. There is also an emphasis on previous research containing a few different measurements (on the tramway track, tramway vehicle and buildings) as a foundation for more detailed research in the future. The purpose of the vibration measurements is to build a model that would define parameters that are connected to different tramway vehicles and tram track. Also, it could predict the change of vibration levels in time, their propagation through the soil as well as the impact of vibrations on the surrounding buildings. That kind of model would serve as a direct indicator and an input to the tramway network operator on how to optimise the needed interventions on the track and in that way additionally lower maintenance costs and increase living standard in the cities.

*Key words: vibrations, tramway traffic, buildings, optimization, maintenance*

## 1 Uvod

Za definiciju širenja vibracija od izvora do pojedinih građevina potrebno je razumijevanje više parametara o kojima ovise nastanak i propagacija vibracija. Interakcija kotača željezničkog vozila s tračnicom predstavlja izvor vibracija, tlo je definirano kao medij kroz koji se šire vibracije dok zadnji parametar predstavljaju građevine na koje se vibracije prenose. U uvodnom dijelu ovog rada predstavljeni su primjeri iz literature vezani uz analizu vibracija od željezničkog vozila. Drugo poglavlje opisuje prethodna istraživanja na ovu temu provedena na Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta te je predstavljena ideja budućih istraživanja vezana uz pojavu vibracija od tračničkog prometa. U zaključku se nalazi kratki osvrt na temu i smjer daljnjeg istraživanja.

### 1.1 Interakcija vozila i kolosijeka kao izvor vibracija

Neupitno je da je kretanje željezničkih vozila po kolosijeku uzrok nastanku vibracija i njihovom širenju u okoliš. Glavni izvor vibracija na željezničkoj pruzi dolazi od kontakta kotača i glave tračnice pri prolasku željezničkog vozila [1]. Vibracije koje se javljaju pri prometovanju željezničkih vozila neželjena su pojava koja utječe na samo vozilo, tračničku infrastrukturu, okolne objekte, a osobito na putnike u vozilu. Mjerenje i analiza vibracija pri prometovanju tračničkih vozila općenito je vrlo bitna jer se iz nje može razlučiti mnogo podataka o stanju samih vozila i tračničke infrastrukture, upozoriti nas na nepravilnosti ili puknuće tračnice i kolosijeka općenito, te nam ukazati na neudobnost vožnje na pojedinim dionicama kolosijeka. Postoje brojne metode koje se koriste za mjerenje vibracija kod tračničkih vozila koja prometuju na klasičnom željezničkom kolosijeku. Takvi kolosijeci većih su osovinskih opterećenja, brzine prometovanja njima su veće i protežu se većim udaljenostima nego što je veličina prosječne tramvajske mreže. Za razliku od klasičnih kolosiječnih konstrukcija, na gradskim kolosijecima prevladavaju se manje udaljenosti, manje su brzine vožnje, drugačije pružanje trase koja često prati mrežu gradskih cesta te može biti velike zakrivljenosti, intenzivniji je promet, izvedba skretnica i križališta koja su generatori najvećih vibracija je drugačija (izvedba u plitkom žlijebu), drugačiji su motivi i očekivanja putnika te uvjeti pri putovanju. Zbog toga je prometovanje tramvajskog, lakog željezničkog vozila, specifično za analizu vibracija i različito od analize vibracija na klasičnom kolosijeku [2].

Detekcija nepravilnosti na kolosijeku u ranoj fazi i pravovremeno održavanje mogu minimalizirati dugoročne troškove željezničke infrastrukture. Monitoring i procjena stanja kolosijeka su proučavani dugi niz godina i iz mnogih istraživanja razvila su se četiri različita pristupa; monitoring baziran i vezan uz infrastrukturu, monitoring infrastrukture baziran na kretanju instrumentiranog vozila, monitoring vozila na bazi kretanja instrumentiranog vozila i monitoring vozila baziran na mjernim postajama

na infrastrukturi. Posebna mjerna vozila koriste se u željezničkim upravama za procjenu stanja kolosijeka, a razvoj jednostavnijih mjernih sustava omogućio je da takvi sustavi budu instalirani i u standardna vozila namijenjena prijevozu putnika. Razvoj moderne elektronike i robusnih senzora (koji mogu biti instalirani ispod standardnih vozila namijenjenim prijevozu putnika) omogućio je monitoring infrastrukture baziran na kretanju vozila. Takav sustav predstavlja učinkovit i relativno jeftin monitoring na dnevnoj bazi sa kontinuiranim ažuriranjima prikupljenih podataka [3].

## 1.2 Vibracije na zgradama

Mnogi parametri mogu imati utjecaj na vibracije koje se šire prema od kolosijeka obližnjim zgradama [4] od kojih je najvažniji udaljenost zgrade od kolosijeka. Udaljavajući se od izvora, vibracije se smanjuju zbog njihove propagacije kroz tlo i gubitka energije na putu od izvora prema prijatelju [1]. U urbanim sredinama vibracije se prenose kroz tlo do okolnih građevina koje su često u neposrednoj blizini kolosijeka i kao takve mogu imati značajan utjecaj na ljude koji žive ili rade u blizini i na same građevine. Najveći rizik od oštećenja postoji za građevine koje su manje od 7 metara udaljene od osi kolosijeka, dok na one koje su udaljene više od 25 metara, vibracije imaju zanemariv utjecaj [5]. Promatrajući vertikalno širenje vibracija unutar građevine, najmanje vibracije očekuju se u podrumu (u temeljima), dok se one najveće pojavljuju na višim katovima građevina [1]. Budući da je odziv građevine (zgrade) podložan pod utjecajem njezinih dinamičkih, strukturalnih i materijalnih karakteristika, jako je izazovno ocijeniti utjecaj koji vibracije imaju na zgrade i njihove stanare [4].

Potrebne su vrlo zahtjevne kalkulacije koje koriste jedinstvene i točne granice za promatranja gibanja tla kako bi se predvidjela oštećenost zgrade, jer na odziv zgrade utječu dinamičke karakteristike te svojstva materijala strukturalna svojstva, dok je konačno otkazivanje često rezultat nekoliko događaja. Za procjenu utjecaja vibracija na dijelove zgrade koriste se dva različita pristupa. Prvi pristup podrazumijeva korištenje metoda koje koriste baze podataka o svojstvima zgrada za izradu modela baziranog na tim podacima, dok se drugi pristup bazira na metodama koje se oslanjaju na direktna mjerenja vibracija na zgradama (npr. mjerenje vibracija uzrokovanih prometom) [6]. Najčešće se koristi vršna brzina vibracija (engl. Peak Particle Velocity - PPV) za opis vibracija jer je PPV relativno neovisan o frekvenciji u usporedbi sa vršnim pomakom ili vršnom akceleracijom [7]. Postoje razne norme i studije koje definiraju različite granice razina vibracijskih brzina koje utječu na ljude i građevine [1]. Prema normi HRN DIN 4150-3: 2016 Vibracije u zgradama - 3.dio: Djelovanje na konstrukcije, građevine su podijeljene na standardne građevine, armirano - betonske građevine i osjetljive građevine (spomenici i druge povijesne građevine, bolnice, stare obiteljske kuće, spremnici za vodu, zidani dimnjaci, itd.) [8]. Navedena norma korištena je u konkretnim primjerima mjerenja vibracija na odabranim lokacijama (starim, zidanim, povijesnim zgradama) u gradu Zagrebu.

### 1.3 Širenje vibracija kroz tlo

Vibracije i buka koje se prenose tлом tema su mnogih istraživanja kako bi se procijenio utjecaj novih željezničkih trasa ili rekonstrukcija postojećih na okoliš i ljude koji žive i rade u blizini željezničke pruge. Istraživači i stručnjaci pristupaju ovoj temi koristeći širok raspon modela predviđanja sa različitim stupnjevima kompleksnosti i preciznosti. Takve modele teško je usporediti i uniformirati jer u velikoj mjeri ovise o veličini baze podataka i iskustvu stručnjaka za vibracije koji izrađuju te modele. U sklopu projekta "SILVARSTAR" [9] stvara se baza podataka vezana uz emisiju vibracija koje nastaju prolaskom željezničkog vozila, njihovo širenje i izradu prijenosnih funkcija. Cilj projekta je razvijanje "user-friendly" alata za predviđanje, koji bi se koristio za izradu projekata vezanih uz utjecaj vibracija koje se šire kroz tlo. Alat je baziran na hibridnom pristupu u frekvencijskoj domeni koji kombinira prednosti numeričkih metoda i eksperimentalnog pristupa. Razina vibracija na zgradama izražava se kao rezultat uvjeta izvora vibracija (željezničko vozilo), širenja (tlo) i svojstva recipijenta (zgrade), gdje je svaki uvjet frekvencijski ovisan i može biti prikazan pomoću numeričkih modela ili eksperimentalnih podataka. Kako bi se osiguralo da će ovakav alat biti sposoban raditi kalkulacije velikog opsega i biti dostupan velikom broju korisnika, biti će izrađen na temelju opširne baze podataka koja uključuje kako izmjerene tako i unaprijed izračunate podatke. Parametri koji opisuju željeznička vozila su izabrani da odgovaraju različitim generičkim tipovima vozila (međugradski vlakovi, metro, tramvajska vozila, teretni vlakovi). Slično su definirani i parametri koji opisuju kolosijeke koji su vezani uz glavne željezničke kolosijeka i kolosijeke u urbanim sredinama (tramvaj, metro) za klasičnu kolosiječnu konstrukciju (sa zastornom prizmom) i kolosijeke na čvrstoj (betonskoj) podlozi. Numerički podaci su dostupni u obliku unaprijed izračunatih vrijednosti na temelju različitih funkcija otpora tla i prijenosnih funkcija u tlu. Kao dodatak numeričkim podacima, postoje i slični empirijski podaci koji sadrže gustoće sile, mogućnost širenja sile linijskog izvora i spektar vibracija na različitim udaljenostima od kolosijeka, temeljeni na dobro dokumentiranim "case study" istraživanjima. Recipijent (zgrada) je opisan pomoću niza korekcijskih faktora koji su različiti za pojedine strukture (zgrade). Ti faktori opisuju prijenos vibracija iz okoline na temelje zgrade, sa temelja na različite katove i širenje zvuka (od vibriranja katova) u prostorije zgrade [9].

## 2 Prethodna istraživanja

Prethodna istraživanja vezana uz ovu temu provođena su od strane zaposlenika Katedre za željeznice, na Zavodu za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u posljednjih nekoliko godina. Naglasak istraživanja je vezan uz mjerenje vibracija koje nastaju prilikom prometovanja tramvajskog vozila po kolosijeku, pro-

učavanje utjecaja nepravilnosti ili oštećenja kolosijeka na vozilo (i na ljude u vozilu) te utjecaja vibracija koje se šire prema okolnim zgradama na same zgrade i ljude koji borave u njima. Cilj budućeg istraživanja je što točnije definirati parametre vezane uz izvor vibracija (vozilo, kolosijek), medij kroz koji se šire vibracije (tlo) i vrstu recipijenta (zgrada) kako bi se pomoću njih napravio model koji može predviđati nastanak povišenih razina vibracija, predvidjeti i ubrzati njihovu detekciju te optimizirati intervenciju na kolosijeku s ciljem smanjivanja tih vibracija.

## 2.1 Mjerenje razina vibracija u tramvajskom vozilu na tramvajskoj mreži u Zagrebu

Vibracije koje se javljaju pri prometovanju željezničkih vozila neželjena su pojava i mogu imati negativan utjecaj na samo vozilo, tračničku infrastrukturu, okolne objekte i na putnike koji se nalaze u vozilu. U sklopu Studije razvoja tramvajskog prometa Grada Zagreba [10] izvršeno je mjerenje indeksa udobnosti vožnje i mirnoće hoda tramvajskog vozila. Pomoću mjerenja i analize vibracija koje se javljaju pri prometovanju tračničkih vozila moguće je prikupiti velik broj podataka o stanju tračničke infrastrukture i vozila. Prikupljeni podaci mogu se koristiti za ocjenu mirnoće hoda, otkrivanje nedostataka na kolosijeku, vozilima i kontaktnoj mreži te ocjenu razine udobnosti u vozilu [11].



Slika 1. Prikaz pozicija akcelerometara na vozilu i izračunatih razina udobnosti vožnje na zagrebačkoj tramvajskoj mreži

U istraživanju koje se provodilo u sklopu ispitivanja na tramvajskoj mreži u Osijeku (2016.) i u Zagrebu (2018.) analizirana je mirnoća hoda tramvajskog vozila i udobnost vožnje. Udobnost vožnje i kvaliteta vožnje tema su brojnih istraživanja u različitim željezničkim upravama [12, 13, 14]. To je kompleksno područje koje uzima u obzir interakciju kolosijeka i vozila, odziva vozila i reakcije ljudi na razine vibracija koje nastaju prilikom prometovanja željezničkog vozila po kolosijeku. Za ocjenu metoda

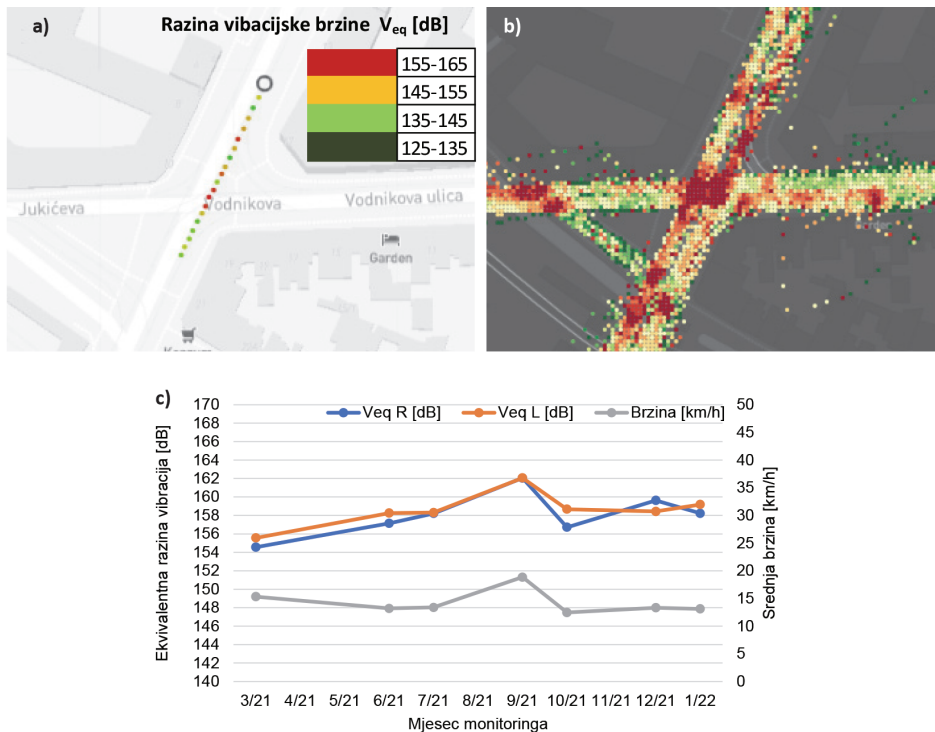
za određivanje mirnoće hoda i udobnosti vožnje korišteni su parametri na osnovi vibracija okretnog postolja i sanduka vozila pomoću konvencionalnog tramvajskog vozila koje je opremljeno odgovarajućom mjernom opremom (Slika 1). Za procjenu udobnosti vožnje duž tramvajske mreže u Zagrebu korištene su tri različite metode: Ekvivalentna razina vibracija (Laeq), Sperlingov indeks vožnje  $W_z$  [15] i metoda prema normi EN 12299 [16] (bazirana na normi ISO 2631 [17]). Mjerenja su obuhvatila cijelu tramvajsku mrežu Zagreba (ukupno 116km pruge) sa različitim konfiguracijama kolosijeka na pojedinim dijelovima mreže. Metoda Sperlingovog indeksa vožnje i metoda kontinuirane udobnosti mogu se na temelju ovakvog pristupa koristiti za ocjenjivanje sveukupne razine udobnosti na poddionicama tramvajske mreže [11]. Buduća istraživanja podrazumijevaju detekciju zavora i naboranosti pomoću frekventne analize prikupljenih podataka razina vibracija prilikom prolaska tramvajskog vozila po tramvajskoj mreži. Ovakav pristup omogućio bi automatizaciju mjerenja naboranosti i nepravilnosti (vozilo prometuje tramvajskom mrežom prema redovnom rasporedu vožnje i konstantno prikuplja podatke o razinama vibracija) te smanjenje troškova održavanja i smanjenje razina vibracija i buke.

## **2.2 Monitoring razina vibracija na tramvajskom kolosijeku uz pomoć instrumentiranog tramvajskog vozila**

U svrhu ocjene stanja kolosijeka te utjecaja vibracija od prometovanja tramvajskih vozila na građevine stradale u potresu M5.5 2020. u Zagrebu, proveden je monitoring razina vibracija nastalih prolaskom tramvajskog vozila po kolosijeku. Razine vibracija mjerene su na cjelokupnoj mreži ZET-a u razdoblju od 10 mjeseci. Na niskopodni tramvaj tipa TMK 2200 instaliran je uređaj za monitoring vibracija koji se sastoji od tri jedinice. Akcelerometri se nalaze na postolju kotača, jedinica zadužena za geolociranje i komunikaciju sa serverom nalazi se na krovu dok se napajanje vrši pomoću jedinice unutar vozila. Svi izmjereni podaci prikupljaju se na udaljeni server putem GSM mreže, te prikazuju u specijaliziranom softveru za prikaz i analizu podataka.

Prilikom mjerenja prikupljani su podaci o vibracijskim brzinama, akceleracijama, GPS poziciji te o brzini prometovanja vozila. Brzina uzorkovanja akcelerometara bila je 500 Hz, dok su razine vibracijskih brzina i akceleracija računate na bazi 1s. Na temelju prikupljenih podataka, moguće je prikazati podatke o razinama vibracijskih brzina za svaku lokaciju koja je snimljena pomoću mjernog tramvaja (Slika 2a). Iz slika 2a i 2b je vidljivo da se najveće razine vibracijskih brzina javljaju prilikom prolaska tramvaja preko križališta (označeno crvenom bojom, 155 - 165 dB). Pomoću drugog modula softvera (Slika 2b), postoji mogućnost usporedbe razine vibracijskih brzina u vremenu za izabranu lokaciju. Ovakav način prikupljanja podataka o stanju kolosijeka pomoću prikaza razine vibracijskih brzina relativno je jeftin i pristupačan jer je moguće da jedno tramvajsko vozilo u jednom danu obiđe nekoliko puta istu

tramvajsku liniju. Takvo mjerenje na dnevnoj, tjednoj, mjesečnoj ili godišnjoj razini (ovisno o potrebama prikupljanja i usporedbe rezultata) sadrži dovoljno podataka za ocjenu stanja kolosijeka i lociranje kritičnih mjesta na mreži. Kao primjer promjene razina vibracijskih brzina i potencijalnu detekciju povećanja istih u vremenu, na slici 2c prikazane su krivulje promjene razina u desetomjesečnom razdoblju (za mjerenje na desnoj,  $V_{eq,R}$ ) i lijevoj kotaču,  $V_{eq,L}$  uz prikaz brzine prolaska vozila) na raskrižju Savske ceste i Vodnikove ulice u smjeru Frankopanske ulice, gdje je vidljiv trend povećanja razina vibracijskih brzina u zadnja četiri mjeseca monitoringa. Signal koji je snimljen pomoću akcelerometara instaliranih na vozilu moguće je obraditi na više načina u različitim frekvencijskim pojasevima (pomoću specijalnih računalnih programa) kako bi se detektirale različite nepravilnosti i oštećenja na kolosijeku. Detaljnija analiza predstavlja potencijalnu mogućnost izrade modela predviđanja degradacije kolosijeka i pravovremene intervencije. Takav model smanjio bi troškove održavanja bez potrebe za ugradnjom skupljih prigušivača u kolosiječnu konstrukciju.



Slika 2. Prikaz: a) razina vibracijskih brzina prilikom prolaska tramvaj na raskrižju Savske ceste i Vodnikove ulice u smjeru Frankopanske ulice, b) prikaz svih izmjerenih razina vibracijskih brzina u 2021 godini, c) prikaz promjene razina vibracijskih brzina u promatranom razdoblju na lijevoj ( $V_{eq,L}$ ) i desnoj ( $V_{eq,R}$ ) tračnici

### 2.3 Dugotrajni monitoring na zgradama

Za razliku od nekih drugih metoda za ocjenu stanja zgrade, mjerenje razina vibracija na zgradama može se provoditi u sklopu dugotrajnog monitoringa bez zadiranja u konstrukcijske elemente zgrade. U literaturi postoje mnogi primjeri gdje se na temelju velikih baza podataka rade modeli predviđanja jačine vibracija, načina propagacije kroz tlo i intenziteta vibracija koje se prenose na zgrade u blizini. U studiji koja je rađena na temelju tramvajskog vozila koji prometuje u Brusselsu, Belgija, razvijen je model predviđanja intenziteta vibracija na izvoru (tramvajskom vozilu) i širenju vibracija kroz tlo. Nakon izrade i evaluacije modela, zaključeno je da se izmjereni podaci jako dobro slažu i poklapaju sa izračunatim podacima iz modela [6]. Ovakav model predviđanja razina vibracija uvelike pojednostavljuje evaluaciju istih i samim time ubrzava postupak razvoja i implementacije optimalnog sustava za smanjivanje vibracija nastalih prolaskom tramvajskog vozila [11]. Dopuštena razina vibracija kojoj ljudi smiju biti izloženi u radnoj okolini i okruženju u kojoj žive regulirana u Europskoj Uniji direktivom 2002/44/EC vezanom uz vibracije u radnoj okolini [18].

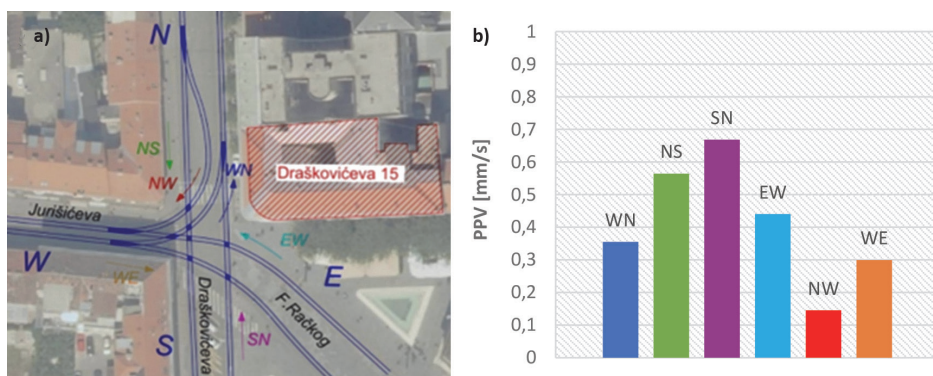


Slika 3. Mjerna lokacija na 4. katu zgrade (Draškovićeve 15) (a), mjerni uređaj "SWARM" (b)

Dodatno, vibracije uzrokovane prometom mogu ometati osjetljive uređaje i opremu, potencijalno uzrokovati strukturalnu i kozmetičku štetu na modernim i starijim zgradama te imati uznemiravajuće učinke na stanare u zgradama. Ovakve vibracije mogu biti uzrok širenju pukotina na zgradama koje su prethodno oštećene (npr. nakon jačeg potresa) [19]. Moguća je i pojava mrvljenja žbuke i raspadanja ziđa zbog čestog ponavljanja opterećenja [1]. U sklopu projekta ocjene cjelokupnog stanja tramvajske mreže u Zagrebu nakon potresa koji se dogodio 22.03.2020., napravljena je detaljna analiza stanja kolosijeka. Za određivanje utjecaja na zgrade koje su oštećene u potresu, na četiri lokacije postavljeni su uređaji za monitoring vibracija



koje nastaju prilikom prolaska tramvajskog vozila. Lokacije su odabrane nakon sveobuhvatne analize rizika koja uzima u obzir tri parametra: stupanj oštećenja zgrada, udaljenost tramvajskog kolosijeka od zgrade i razine vibracija na tramvajskom kolosijeku (izvor vibracija). Uređaji su postavljeni na lokacijama na zgradi gdje se očekuju najveće vibracije sukladno normi HRN DIN 4150-3 - Vibracije u zgradama - Utjecaj na konstrukcije [8]. Montaža ovakvih uređaja (SWARM) (Slika 4b) vrlo je jednostavna i praktična jer ne zahtjeva mnogo vremena kako bi se započelo sa monitoringom vibracija. Vibracije su mjerene sukladno normi [8] a za analizu potencijalnih utjecaja tramvajskog prometa na građevine u potresu uzeti su najstroži kriteriji utjecaja trajnih vibracija (na osjetljive građevine) gdje je graničnu vrijednost predstavljala vršna brzina vibracija  $PPV = 2.5 \text{ mm/s}$ .

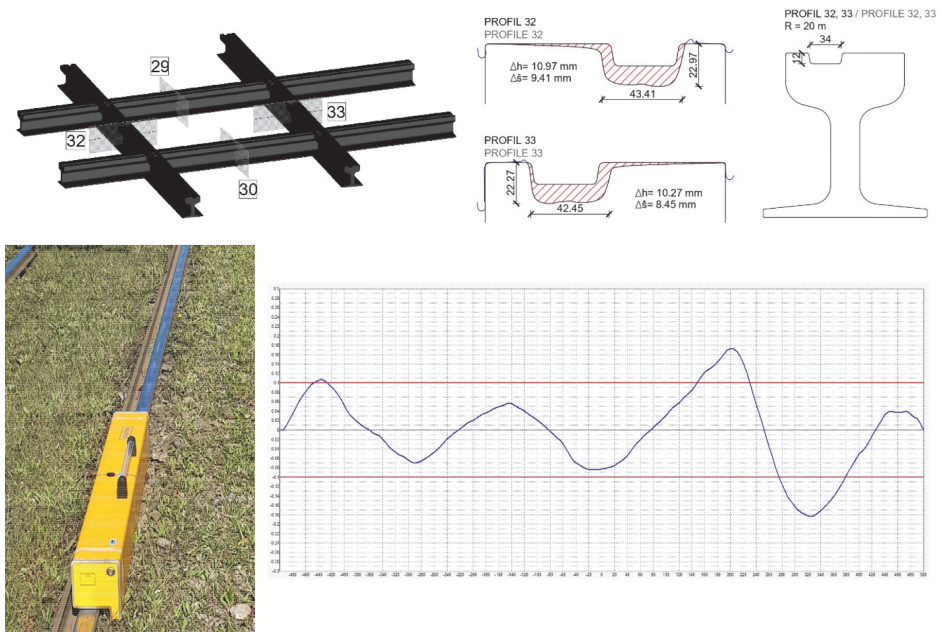


Slika 4. Prikaz: a) raskrižja Draškovićeve - F. Račkoga - Jurišičeve sa naznačenim smjerovima kretanja vozila, b) izmjerenih vršnih vibracijskih brzina pri prolazima tramvaja TMK 2200 u različitim smjerovima vožnje

U centraliziranoj bazi podataka koja je povezana sa SWARM uređajem (slika 3b), moguće je promatrati kretanje vršnih vibracijskih brzina u izabranom vremenskom periodu i analizirati je li došlo do promjena u razinama vibracijskih brzina. Dodatno, ovakav sustav monitoringa ima mogućnost upozorenja korisnika putem alarma ako vršne vibracijske brzine prekorače postavljene granice. Na takav način moguće je pravovremeno intervenirati kako bi se smanjile vibracijske brzine i rizik za zgrade kao i neugoda za stanare. Na slici 3a prikazana je jedna od lokacija na adresi Draškovićeve 15 uz dodatni prikaz raskrižja sa svim smjerovima kretanja vozila na slici 4a. Rezultati analize prosječnih vršnih vibracijskih brzina obzirom na udaljenost kolosijeka od zgrade (mjerno mjesto na nosivom zidu 4. kata zgrade u Draškovićevoj 15, slika 3a) prema smjerovima kretanja vozila prikazani su na slici 4b. Iz grafova se može jasno očitati kako najveće vibracije pobuđuje prolazak tramvaja u smjeru jug - sjever ( $S \rightarrow N$ ) jer je taj kolosijek najbliži zgradi (11m udaljen od pročelja).

### 3 Nastavak istraživanja

Nastavno na analizu razina vibracija obzirom na udaljenost kolosijeka od zgrade, napravljene su i analize utjecaja brzine prolaska tramvajskog vozila i tipa tramvajskog vozila na kretanje razina vibracijskih brzina. Kao iduća faza u ovom dijelu istraživanja planira se mjerenje i analiza stanja kolosijeka (mjerenje geometrije glave tračnice u križalištima i mjerenje naboranosti vozne površine tračnice (Slika 5) čime se želi istražiti utjecaj stanja kolosijeka na razine vibracijskih brzina koje se emitiraju prilikom prolaska tramvajskog vozila.



Slika 5. Prikaz profila križališta uz usporedbu izmjenog profila i referentnog profila tračnice (gore), mjerenje direktne naboranosti na tračnici sa prikazom izmjerene naboranosti (dolje)

Za detaljniju analizu utjecaja stanja kolosijeka na razine vibracijskih brzina, planirano je u daljnjem istraživanju dodatnom analizom i obradom rezultata mjerenja naboranosti na kolosijeku (direktna metoda) izračunati vrijednosti koje bi bile usporedive sa vrijednostima razine vibracijskih brzina izmjerenih indirektnom metodom (mjerenje vibracija pomoću akcelerometara na tramvajskom vozilu). Konačno, usporedba direktne i indirektno mjerenja predstavljala bi bazu za daljnja istraživanja i izradu modela procjene razvoja naboranosti (s obzirom na amplitudu i valne duljine nabora) koji bi služio za razvoj optimalnog rasporeda održavanja (brušenja) kolosijeka. Dodatno, model bi se temeljio na indirektnim mjerenjima po-

moću akcelerometara instaliranih na tramvajskom vozilu (u redovnom rasporedu prometovanja vozila) što bi predstavljalo veliko pojednostavljenje (nema potrebe za ručnim mjerenjem) i dodatna financijska rasterećenja pri održavanju tramvajske mreže kao i smanjenje razina buke i vibracija.

## 4 Zaključak

Mjerenje i dugotrajni monitoring vibracija koje nastaju prolaskom tramvajskog vozila po kolosijeku praktični su i primjenjivi za prikupljanje velikog broja podataka koji se mogu koristiti za kasniju obradu. Takva baza podataka je temelj za izradu modela detekcije pojedinih nepravilnosti i oštećenja na tramvajskim kolosijecima i predviđanja njihovog napredovanja. Na bazi trenda vibracija kroz duži vremenski period moguće je na temelju kontinuiranog monitoringa planirati pravovremene i ciljane intervencije na kolosijeku. Analizom relativne promjene vibracija nakon izvršenih rekonstrukcija uz kontinuirani monitoring također je moguće verificirati učinkovitost primijenjenih metoda sanacije. Vibracije je moguće i dodatno analizirati promatrajući pojedinačne nepravilnosti (npr. naboranost tračnice) ili oštećene (puknute) zavare. Uz pomoć tih podataka moguće je napraviti model pomoću kojega bi se organiziralo sustavno brušenja tračnica (ovisno o vibracijama koje nastaju prolaskom tramvajskog vozila po kolosijeku i starosti tračnica) sa svrhom produljenja životnog vijeka tračnice i smanjivanja buke i vibracija. Kod detaljnije analize vibracija potrebno je što točnije definirati parametre vezane uz izvor vibracija (kolosijek, tračničko vozilo), medij kroz koji se vibracije šire (tlo) i recipijenta (zgrada, građevina) kako bi se pomoću prikupljenih podataka o vibracijama mogao napraviti model predviđanja širenja vibracija od izvora i vibracija koje se pojavljuju na zgradama.

## Literatura

- [1] Haladin, I., Bogut, M., Lakušić, S.: Analysis of tram traffic-induced vibration influence on earthquake damaged buildings, *Buildings* (2021), 11, <https://doi.org/10.3390/buildings11120590>.
- [2] Burnać, K.: Analiza vibracija tramvajskog vozila s obzirom na stanje tramvajskog kolosijeka, Univeristy of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2019.
- [3] Bocz, P., Vinkó, Á., Posgay, Z.: A practical approach to tramway track condition monitoring: vertical track defects detection and identification using time-frequency processing technique, *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering* (2018), 13, pp.135-46. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2018-0013>.
- [4] Erkal, A.: Transmission of Traffic-induced Vibrations on and around the Minaret of Little Hagia Sophia, *International Journal of Architectural Heritage* (2017), 11, pp.349-62, <https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1230657>.

- [5] Lakušić, S., Ahac, M.: Vibracije od željezničkog prometa, *Gospodarenje prometnom infrastrukturom* (2009), p. 373-418.
- [6] Kouroussis, G., Verlinden, O., Conti, C.: Contribution of vehicle/track dynamics to the ground vibrations induced by the Brussels tramway, *Science of The Total Environment* (2014), Vol. 482-483, pp. 452-460, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.083>.
- [7] Hao, H., Ang, T.C., Shen, J.: Building vibration to traffic-induced ground motion, *Building and Environment* (2001), 36, pp.321-36
- [8] HRN DIN 4150-3:2016 Vibrations in Buildings-Part 3: Effects on structures, 2020.
- [9] Geert Degrande, A., Lombaert, G., Ntotsios, E., Thompson, D., Nélain, B., Bouvet, P., et al.: SILVARSTAR Soil Vibration and Auralisation Software Tools for Application in Railways H2020 Collaborative Projects Research and Innovation Action S2R-OC-CCA-01-2020: Noise and Vibration Deliverable D1.1 STATE-OF-THE-ART AND CONCEPT OF THE VIBRATION PREDICTION TOOL, 2021.
- [10] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M., Bartolac, M., Bogut, M., Damjanović, D., et al.: Study on the tram traffic development in Zagreb, Report, Analysis of Tramway Track Condition, 2019.
- [11] Haladin, I., Lakušić, S., Bogut, M.: Overview and analysis of methods for assessing ride comfort on tram tracks, *Gradjevinar* (2019), 71, pp.901-21, <https://doi.org/10.14256/JCE.2731.2019>
- [12] Dumitriu, M., Stănică, D.I.: Study on the Evaluation Methods of the Vertical Ride Comfort of Railway Vehicle-Mean Comfort Method and Sperling's Method, *Applied Sciences* (2021), 11, <https://doi.org/10.3390/app11093953>.
- [13] Falamarzi, A., Moridpour, S., Nazem, M.: Development of a tram track degradation prediction model based on the acceleration data, *Structure and Infrastructure Engineering* (2019), 15, 1308-18, <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1615963>
- [14] Vinkó, Á.: Monitoring and condition assessment of tramway track using in-service vehicle, *Pollack Periodica* (2016), 11, 73-82, <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.3.7>
- [15] Garg, V.K., Dukkipati R., V.: Dynamics of railway vehicle systems, London, Academic Press, 1984.
- [16] HRN EN 12299:2009 Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation (EN 12299:2009), 2009.
- [17] 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 system, 2010.

- [18] DIRECTIVE 2002/44/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration), 2002.
- [19] Tomažević, M., Žnidarič, A., Klemenc, I., Lavrič, I.: The influence of traffic induced vibrations on historic stone masonry buildings, In Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, Stationery Office, pp. 631, 2002.